

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra dopravního stavitelství

Šíření hluku a vibrací z provozu tramvajové dopravy
v podmínkách DP Ostrava

Diffusion of noise and vibration from tramway traffic in
conditions of DP Ostrava

Student:

Bc. Jan Kramný

Vedoucí diplomové práce

Ing. Leopold Hudeček Ph.D.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30. 11. 2009.

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 30. 11. 2009.

.....

podpis studenta

Anotace

Pryč jsou doby, kdy byly dopravní systémy městské hromadné dopravy posuzovány jen z hlediska výkonnosti. V Dnešní době je více než kdy jindy kladen důraz i na jejich vliv na okolní prostředí a obyvatele.

Tato práce se zaměřuje na problematiku šíření hluku a vibrací z provozu tramvajové dopravy v podmínkách Dopravního podniku Ostrava. A to zejména na vypracování uceleného teoretického podkladu, popisu a vyhodnocení opatření, která byla až do této doby provedena. Není zaměřena jen na prostý výčet opatření a popis problematiky, ale také na návrh protihlukových a protivibračních opatření za použití pružných prvků do konstrukce tramvajového svršku, vyhodnocení výsledků měření a následná doporučení.

Annotation

The times when the transportation system was assessed only by its capacity are gone. Today, far more than ever, the accent is given to its influence on local environment and inhabitants.

This thesis is focused on noise and vibration diffusion of tramway traffic in local conditions of DP Ostrava. Explaining of the problematic, description of currently used technologies and searching for new solutions to suppress noise and vibration diffusion of tramway traffic in local conditions of DP Ostrava. The produce of this thesis is evaluation of currently used technologies and its analysis.

Obsah:

Obsah.....	6
1 Úvod do problematiky.....	9
1.1 Hluk a jeho definice.....	10
1.2 Základní pojmy.....	11
1.2.1 Zvuk.....	11
1.2.2 Vibrace.....	11
1.2.3 Akustický tlak.....	12
1.2.4 Hladina akustického tlaku.....	13
1.2.5 Ekvivalentní hladina hluku.....	13
1.2.6 Spektrální analýza hladin hluku.....	14
1.3 Křivky stejné hlasitosti a váhové filtry.....	14
2 Zdroje hluku kolejové dopravy.....	16
2.1 Přenos zemního hluku do okolí.....	21
2.2 Základní charakteristiky a specifika tramvajového provozu.....	21
3 Rozdělení možných opatření.....	22
3.1 Protihluková a protivibrační opatření aplikovaná na vozidlo.....	23
3.2 Protihluková opatření aplikovaná na trať.....	25
3.3 Protivibrační opatření aplikovaná na trať.....	28
4 Současná opatření u DPO a.s.	32
4.1 Ostrava – Martinov 2001, Betonový pražec SB8 s pružnou ložnou plochou.....	32
4.1.1 Metodika měření.....	34
4.1.2 Výsledky měření.....	34
4.2 Ostrava – Poruba 2004, Pryžové bokovnice.....	35
4.2.1 Metodika měření.....	35
4.2.2 Výsledky měření.....	36
4.3 Ostrava - Centrum 2005, Pryžové bokovnice instalované do zakrytého svršku..	38
4.3.1 Metodika měření.....	38
4.3.2 Výsledky měření.....	39
4.4 Ostrava – Dubina 2008, různé upínací systémy.....	41
4.4.1 Měřicí zařízení a metodika měření.....	43
4.4.2 Výsledky měření.....	44
4.5 Ostrava - Hrabůvka 2008, pryžové rohože na zádlažbových panelech.....	46

4.5.1	Měřicí zařízení a metodika měření.....	49
4.5.2	Výsledky měření.....	50
4.6	Ostrava – Vítkovice 2009, Aplikace prvků snižujících vibrace.....	60
4.6.1	Měřicí zařízení a metodika měření.....	66
4.6.2	Výsledky měření.....	69
4.7	Ostrava – Mariánské Hory 2009, Měření hluku na koleji s „vlnkovitostí“	74
4.7.1	Měřicí zařízení a metodika měření.....	76
4.7.2	Výsledky měření.....	77
5	Analýza a vysvětlení výsledků.....	79
5.1	Ostrava - Hrabůvka 2008, pryžové rohože na zádlažbových panelech.....	79
5.1.1	Pokles akustického tlaku ve většině frekvencí a poukázání na „špičku“.	79
5.2.1	Přiřazení možných původců ke „špičce“	81
5.2	Ostrava – Vítkovice 2009, Aplikace prvků snižujících vibrace.....	83
5.3	Ostrava – Mariánské Hory 2009, Měření hluku na koleji s „vlnkovitostí“	84
6	Závěr a doporučení.....	86
6.1	Opatření pro omezení hluku původem ze styku kolo – kolejnice.....	86
6.2	Další stavební úpravy tramvajového svršku.....	88
6.3	Opatření pro zkvalitnění měření na zkušebních úsecích.....	88
7	Seznamy.....	92
7.1	Seznam použité literatury.....	92
7.2	Seznam tabulek.....	93
7.3	Seznam obrázků.....	94

Seznam použitých symbolů a zkratek

DPO a.s.	Dopravní podnik Ostrava a.s.
VŠB - TUO	Vysoká škola Báňská Technická univerzita Ostrava

1 Úvod do problematiky

Pryč jsou doby, kdy byly dopravní systémy městské hromadné dopravy posuzovány jen z hlediska výkonnosti. V dnešní době je více než v minulosti kladen důraz i na jejich vliv na okolní prostředí a obyvatele. Pro minimalizování hluku z provozu tramvajové dopravy je třeba postupovat systematicky. To nejde bez uceleného teoretického podkladu, popisu a vyhodnocení opatření, která byla až do této doby provedena. Tato práce není zaměřena jen na prostý výčet opatření a popis problematiky, ale z velké části také na návrh protihlukových a protivibračních opatření za použití pružných prvků do konstrukce tramvajového svršku, vyhodnocení výsledků měření a následná doporučení.

Celý problém nastal v době, kdy již proběhlo územní řízení o prodloužení tramvajové trati směrem od ulice 17. Listopadu k Duze. Avšak úřady městských částí Poruba a Pustkovec se vyjádřily proti a tím bylo celé řízení navzdory územnímu plánu, který s touto tratí počítá zastaveno. Hlavním argumentem byla obava z nárůstu hlučnosti vlivem provozu tramvajové dopravy. Tato obava je velmi častá a prosazení nových tramvajových tratí ve stávající zástavbě velmi obtížné. Obava je to však opodstatněná neboť je známo, že chronické vystavení hluku způsobuje nevratné poškození sluchu, pískání v uších, poruchy spánku, afektové nebo depresivní stavy, vysoký krevní tlak, ischemickou chorobu srdeční a další kardiovaskulární problémy. „Například dle údajů Světové zdravotnické organizace bylo chronické vystavení hluku určeno jako rozhodující příčinou 3 % úmrtí na ischemickou chorobu srdeční v Evropě“ [12]. K celé problematice je nezbytné zaujmout pokud možno nestranné stanovisko. Na jedné straně stojí občané se svým, jistě oprávněným požadavkem, na nehlukný dopravní systém a na straně druhé dopravní inženýři snažící se o vytvoření systému co možná nejefektivnějšího. Řešení je však třeba hledat uvnitř tohoto intervalu. Neboť řešení nejméně hlučné, může pro změnu vykazovat nejvyšší míru znečištění ovzduší, případně nejnižší přepravní výkon. Rovněž ekonomické náklady různých způsobů veřejné dopravy se velice odlišují a je třeba i v tomto ohledu nalézt ideální řešení. Řešení ideální, avšak nejen z hlediska krátkodobého, ale především v delším časovém horizontu. Jak je nyní patrné, nalézt komplexní řešení zohledňující požadavky všech stran je velmi složitý, časově i finančně nákladný proces. Tato práce nemá ambici vyřešit celou problematiku. Jejím účelem je zaměřit se pouze na šíření hluku a vibrací z provozu tramvajové dopravy v podmínkách DPO a.s. a poskytnout přehled dané problematiky, popis stávajících opatření u DPO a.s., analyzovat výsledky měření jednotlivých technických opatření a doporučit DPO a.s. jak dále postupovat při jejich snižování.

Z výše uvedených důvodů, na žádost DPO a.s., byl odstartován projekt zabývající se snížením šíření hluku a vibrací z provozu tramvajové dopravy. Cílem tohoto projektu, na němž spolupracuje DPO a.s. s Katedrou dopravy Fakulty stavební VŠB-TU Ostrava a s Katedrou částí a mechanismu strojů, Fakulty strojní, VŠB-TU Ostrava, je vytvoření uceleného návrhu způsobu snížení hlučnosti z provozu tramvajové dopravy a to jak z provozního, tak z technického a konstrukčního hlediska. Bylo konstatováno, že předpokladem k efektivnímu snižování hladiny hluku a vibrací z tramvajové dopravy je potřeba systematické a vyvážené aplikace prvků a opatření v obou směrech šíření hluku a vibrací od zdroje, kterými jsou zejména:

- **od kolejnice** dále přenášené vibrace do prvků konstrukce tratě
- **od kola** dále přenášené vibrace do prvků vozidla

Pro splnění tohoto cíle bylo v první fázi navrženo vybudování 4 zkušebních úseků (detailní popis viz 4.6) na ulici Závodní s následným měřením hluku a vibrací. Tato měření byla vyhodnocena spolu s měřením na ulici 28. října v úseku od křižovatky s ulicí Výstavní ve směru do centra, kde byl měřen hluk z provozu na trati s kolejnicemi s vlnkovitostí a bez vlnkovitosti a také se zkušebním úsekem na ulici Závodní kde byl standardní zádlahový panel nahrazen panelem s pryžovou profilovanou vrstvou (viz. 4.5). Rovněž byl pro srovnání uveden popis a stručné výsledky ostatních měření provedených na zkušebních úsecích různých technologií, ve většině případů na objednávku DPO a.s., v letech 2001 – 2009.

1.1 Hluk a jeho definice

Zvuk je přirozeným projevem přírodních jevů a životní aktivity člověka. Pojmem hluk lze označit každý nežádoucí nebo nepříjemný zvuk. Jinak nelze hluk dále definovat, neboť každý máme jiná kritéria a co je pro jednoho hlukem, pro druhého hlukem být nemusí. Proto se snažíme bojovat proti nadměrně silnému hluku, který člověka ruší, případně ohrožuje jeho zdravotní stav.

Nebezpečnost hluku je prokázána i v případech, kdy se přímo nejedná o zmenšení citlivosti sluchu nebo o hluchotu. Nadměrná hlučnost má po sociálně kulturní stránce přímou souvislost s kvalitou bydlení a trávení volného času. Stejně tak nadměrná hluková expozice pracujících snižuje produktivitu práce a významně ohrožuje její kvalitu. Zvuk vyzařovaný dopravními prostředky je většinou považován za obtěžující a nadále jej budeme označovat jako hluk.

1.2 Základní pojmy

Podstatou zvuku i vibrací je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 – 20 000 Hz, které se šíří určitým prostředím určitou rychlostí. Zvuk se může šířit v plynných, kapalných i pevných látkách ve formě podélného, nebo příčného akustického vlnění. V rozsahu slyšitelných frekvencí označujeme:

1.2.1 Zvuk

Zvuk je každé podélné mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem. Frekvence tohoto vlnění leží v rozsahu 20 Hz až 20 kHz; za jeho hranicemi již člověk zvuk sluchem nevnímá.

1.2.2 Vibrace

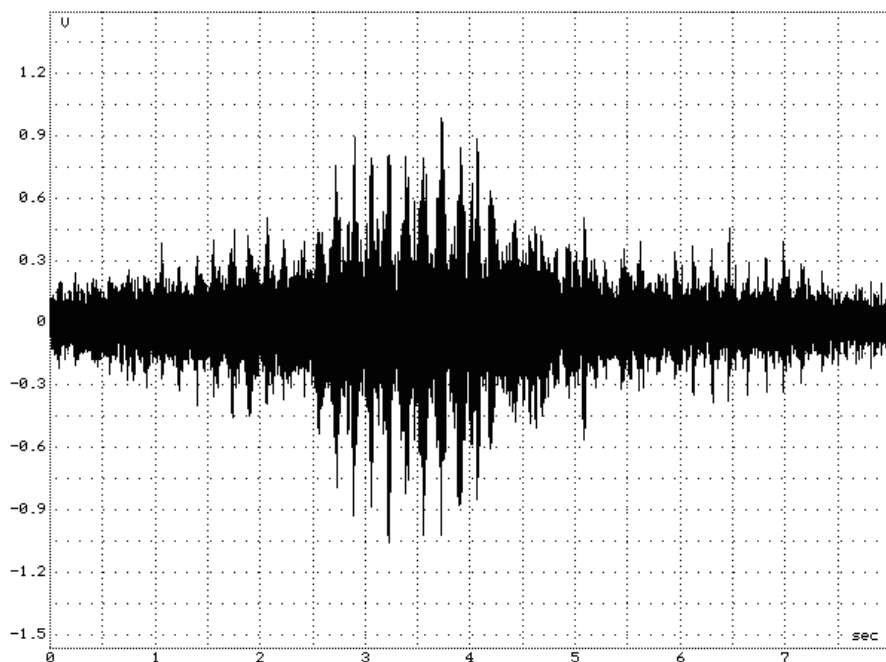
Příčné vlnění v tuhých látkách (bez frekvenčního omezení). Vibrace způsobují namáhání materiálu, které může vést k poruše zahrnované často pod pojem únavových poruch. Vibrace mohou poškozovat budovy různě, od malých trhlin až po praskliny zdiva, klesání základů apod. Problémem je i to, že vyvolávají negativní účinek na osoby. Při analýze vibrací se proto sleduje jak seizmické zatížení vlastní stavební konstrukce, tak i fyziologický vliv na obyvatelstvo.

1.2.3 Akustický tlak

Částice prostředí se se šířícím rozruchem vychylují z klidové polohy podélně nebo příčně ke směru šíření. Tím se v určitých částech homogenního pružného prostředí hustota částic zvyšuje, v jiných pak snižuje. Tlak v místě zředění a zhuštění vzduchových částic klesá a stoupá ve srovnání s tlakem normálním (barometrickým). Dostoupí-li střídavá složka akustického tlaku určité minimální hodnoty, zvané práh slyšitelnosti, nastává ve sluchovém orgánu pocit slyšení.

$$p_{eqt,A} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n p_{i,fast,A}\right)^2}{n}} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

kde $p_{eqt,A}$ ekvivalentní hodnota akustického tlaku s filtrem typu A [Pa]
stanovená z doby průjezdu,
 $p_{i,fast,A}$ okamžitá hodnota akustického tlaku *fast* [Pa],
 n počet hodnot *fast* v záznamu,



Obr. 1. Příklad záznamu akustického tlaku z průjezdu tramvaje referenčním úsekem

1.2.4 Hladina akustického tlaku

Vzrůst subjektivního sluchového i hmatového vjemu se v zásadě řídí logaritmickým zákonem. Akustické veličiny se běžně mění i o několik řádů - samotný akustický tlak pak v rozmezí od $2 \cdot 10^{-5}$ do $2 \cdot 10^3$ Pa. Proto je jejich vyjádření v základních jednotkách značně nepraktické a zavádíme pojem hladina akustických veličin, jejichž jednotkou je decibel [dB].

$L_{eqt,A}$ - ekvivalentní hladina akustického tlaku počítaná jako efektivní hodnota $p_{eqt,A}$ [Pa] z hodnot akustického tlaku (1) a výsledná hodnota následně přepočtena na hladinu akustického tlaku $L_{eqt,A}$ [dB] podle vztahu (2) - index A označuje použití váhového filtru A. (Více viz 1.3 Křivky stejné hlasitosti a váhové filtry):

$$L_{eqt,A} = 10 \cdot \log \left(\frac{p_{eqt,A}}{p_0} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

kde p_0 referenční hodnota akustického tlaku = $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]
(pro vzduch).

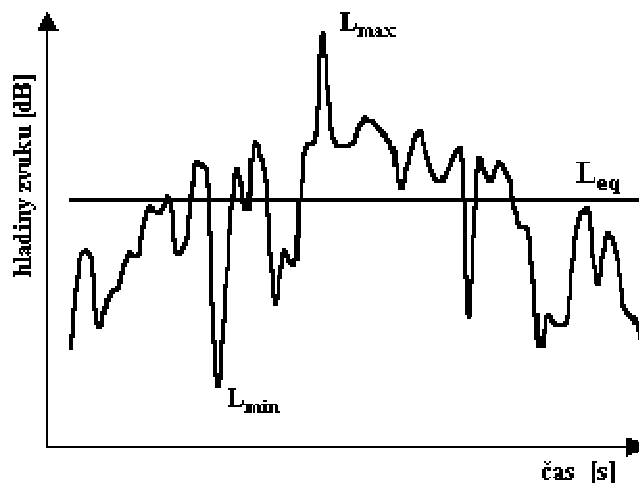
$L_{fast,A}$ - maximum z efektivních hodnot akustického tlaku $p_{fast,A}$ ze záznamu délky 0,125 sekundy, měřeného zvukoměrem opatřeným filtrem typu A.

$L_{max,A}$ - nejvyšší hladina akustického tlaku A z každého měření. Hodnota je odečtena z grafu průběhu akustického tlaku $p_{max,A}$ [Pa] (Viz Obr. 1) a analogicky přepočtena na hladinu akustického tlaku $L_{max,A}$ [dB] dle vztahu (2), kde na místo hodnoty $p_{fast,A}$ je dosazena hodnota $p_{max,A}$.

1.2.5 Ekvivalentní hladina hluku

Ekvivalentní hladina hluku je jednočíselné hodnocení hluku uvádějící ekvivalentní, maximální nebo jinou charakteristickou hladinu hluku pro určitý časový interval. Toto

hodnocení je vhodné zejména z hygienického hlediska pro posouzení akustického klimatu životního nebo pracovního prostředí.



Obr. 2. Maximální, minimální a ekvivalentní hladina hluku

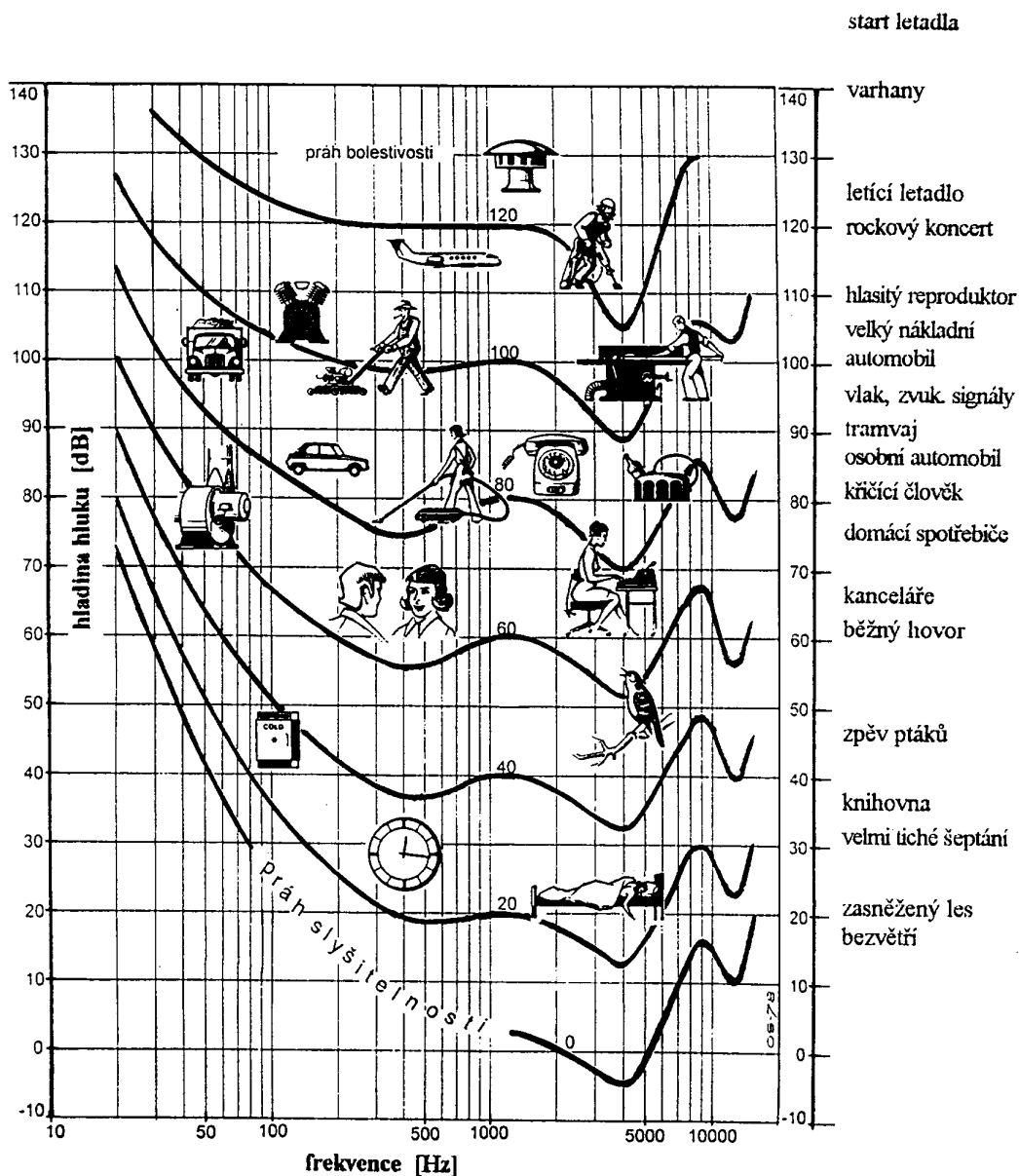
1.2.6 Spektrální analýza hladin hluku

Spektrální analýza hladin hluku je vhodnější pro technické hodnocení konstrukcí. Takto můžeme určit významné frekvenční složky a navrhnout vhodná ochranná opatření. Pomocí spektra hladin hluku je možné, při dostatečném počtu měření, posoudit v jaké frekvenční oblasti se projeví změna konstrukce tramvajové trati, případně vliv vloženého tlumícího prvku nebo vliv broušení.

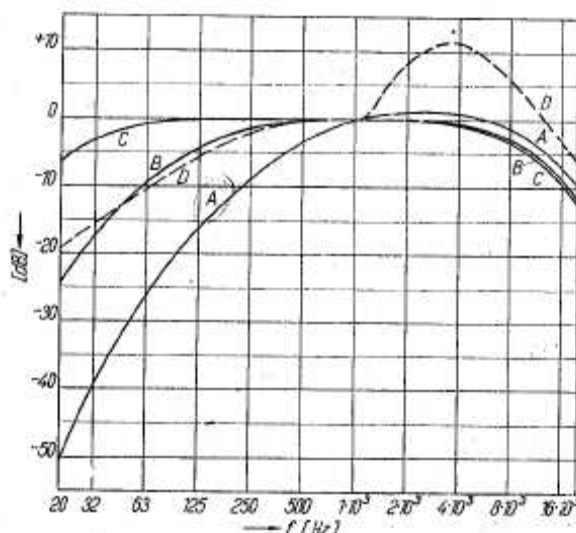
1.3 Křivky stejné hlasitosti a váhové filtry

Protože sluchový orgán má nelineární vlastnosti pro všechny veličiny, kterými můžeme hluk popsat, je jeho měření a hlavně hodnocení značně složité. Hluky stejných hlasitostí, ale různých frekvencí, jsou subjektivně vnímány jako různě hlasité (Obr. 2). Proto je obvykle hluk železniční dopravy, u níž se frekvence významných složek pohybují nejvýše do 2 kHz, vnímán jako méně rušivý, než hluk silniční dopravy s významnými složkami do 5 kHz. Ještě rušivěji působí průmyslový hluk s významnými složkami i nad 10 kHz. Pro posouzení vlivu

hluku na člověka je proto třeba používat váhový filtr A (Obr. 3), kterým se jednotlivým frekvenčním složkám přisuzuje různá váha, úměrná jejich vnímání člověkem. Veškeré akustické veličiny měřené nebo upravené pomocí váhového filtru A jsou potom označovány navíc indexem A. Přímo měřená ekvivalentní hladina hluku bude označena L_{eq} , ekvivalentní hladina hluku měřená s filtrem A (ekvivalentní hladina akustického tlaku A) bude tedy označena L_{Aeq} .



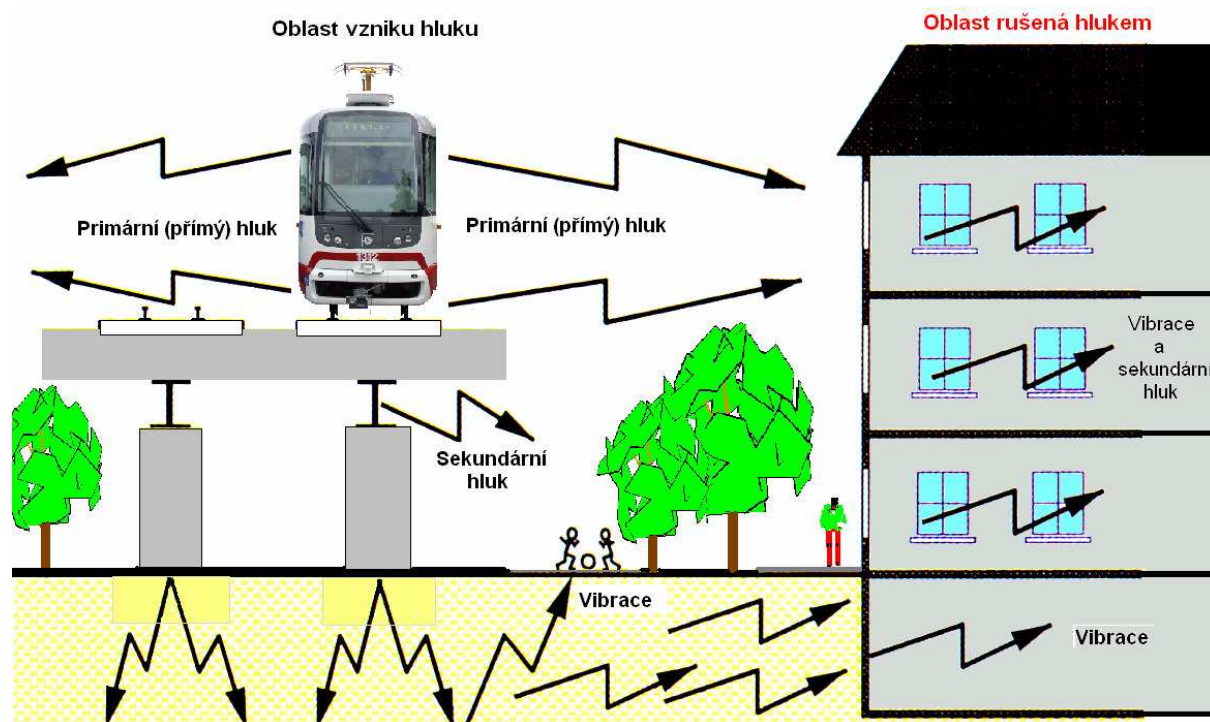
Obr. 3. Křivky stejné hlasitosti



Obr. 4. Váhové filtry

2 Zdroje hluku kolejové dopravy

Hluk z tramvajové dopravy je časově nepravidelně proměnný hluk složený z mnoha dílčích hluků, jejichž zdrojem jsou všechny pohybující se součásti. Tramvajový vlak se pohybuje po tramvajové trati. Tím dochází k přenosu chvění, které se dále šíří konstrukcí tratě a okolní zeminou ve formě vibrací. Hluk je tedy přímo vyzařován vozidlem a tramvajovou tratí jako vzdušný hluk a zároveň se šíří formou vibrací a může působit na stavby v jeho dosahu, které tímto rozechvívá, případně rozkmitává plošné prvky, a které následně generují tzv. hluk sekundární. Hovoříme-li tedy o hluku z provozu kolejových vozidel, není tím míněna pouze jeho akustická složka, ale i tzv. „zemní hluk“, tj. zvuk i vibrace šířící se z kolejového svršku do zemního podloží tratě a odtud zemí do okolní zástavby.



Obr. 5. Šíření hluku z tramvajové dopravy

Míst vzniku hluku z provozu kolejových vozidel, ale i fyzikálně mechanických příčin jeho vzniku, je více. Proto zdroje hluku z tramvajové dopravy můžeme rozdělit do skupin s rozdílnými vlastnostmi.

- **Valivý hluk**

Hluk vyvolaný interakcí nerovností na povrchu kola a kolejnice. Je výrazně ovlivněn tvarem a stavem hlavy kolejnice, nákolku a okolku kola. Dále pak změnami v tuhosti uložení koleje, nespojitostmi a nerovnostmi ve stycích kolejnic. Pro valivý hluk je z hlediska akustických emisí dominantní takzvaná drsnost pojížděné plochy hlavy kolejnice a jízdnic ploch kola.

Do této kategorie se řadí veškerý hluk z pojezdu vozidla a veškerý hluk vyzařovaný z tramvajové trati. Při rychlostech do 60 km.h^{-1} převažuje a tvoří nejvýznamnější složku celkového hluku kolejové dopravy, která narůstá lineárně a je nepřímo úměrná rychlosti vozidla. Při běžné rychlosti tramvajové dopravy v centrálních částech měst, tvoří 80 – 90 % celkové hlukové emise. Valivý hluk tramvajové dopravy je emitován nejvýše ve výšce podlahy vozidla. (0,75 m a často i méně).

Jelikož má valivý hluk největší podíl na hlukových emisích z provozu tramvajové dopravy, je třeba rozlišit, jak se na něm podílejí jednotlivé prvky trati a vozidla. Protože v současné době není k dispozici studie zabývající se rozlišením a přidělením frekvencí k jednotlivým prvkům tramvajové trati, jsou dále pro příklad uvedeny frekvence jednotlivých zdrojů hluku pro vlaky do rychlosti 200 km/h.

Pražce generují hluk o frekvencích do 400 Hz a to hlavně z důvodu jejich hmotnosti a oddělení od kolejnice elasticou podložkou.

Kolejnice svými vibracemi generují hluk ve středním frekvenčním pásmu přibližně od 800 do 2000 Hz.

Kola produkují hluk v horní části frekvenčního pásma a to od 1600 do 4000 Hz a výše. Jak je patrné z křivek stejné hlasitosti (Obr. 3), lidský sluch je více citlivý na frekvence 2000 Hz a výše než na frekvence pod touto hranicí. Z hlediska celkové hlukové emise valivého hluku tedy převažuje část emitovaná kolejnicí [23].

- **Hluk motorů trakčních vozidel**

Hluk hnacích motorů, kompresorů, chlazení, sání apod., hluk z kmitání vozové skříně a hluk pomocných agregátů (ventilace, klimatizace, osvětlení, apod.). Tento druh hluku převažuje u vyšších rychlostí a narůstá s její třetí mocninou. U tramvajové dopravy s převažující rychlostí do 40 km.h⁻¹ není vliv rychlosti obvykle tak významný. Důležitou složkou tohoto druhu hluku je hluk trakčních motorů, který je dominantní při rychlostech do 60 km/h a s rychlostí se téměř nemění [8].

- **Hluk sběrače elektrického proudu**

Hluk působený třením mezi sběračem elektrického proudu a trolejí. Závisí především na volbě použitých materiálů a jejich vlastnostech. U tramvajové dopravy má na celkový hluk jen velmi malý vliv, a proto se jím tato práce dále již nezabývá.

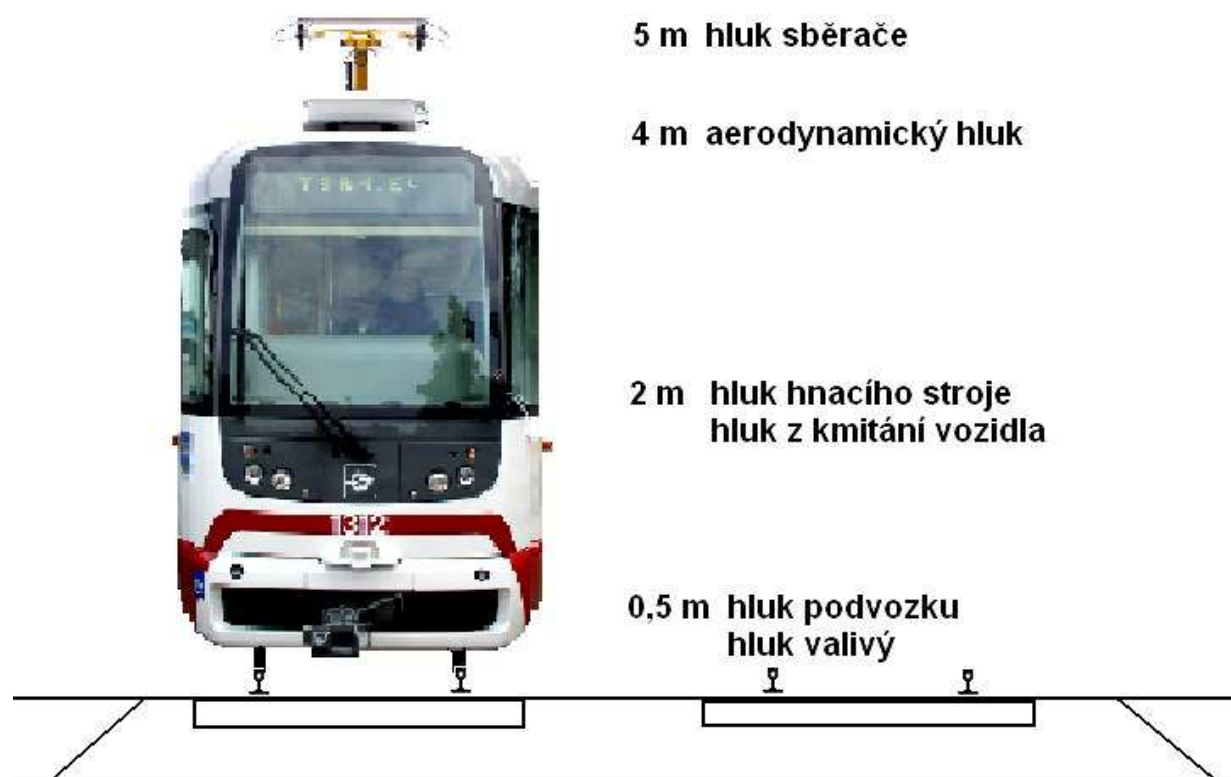
- **Lokální dopravní hluky**

Hluk generovaný při rozjíždění a brzdění, výstražné signály. Významnými lokálními zdroji hluku jsou jízda přes kolejová rozvětvení a křížení, zejména výměny, srdcovky a jízda

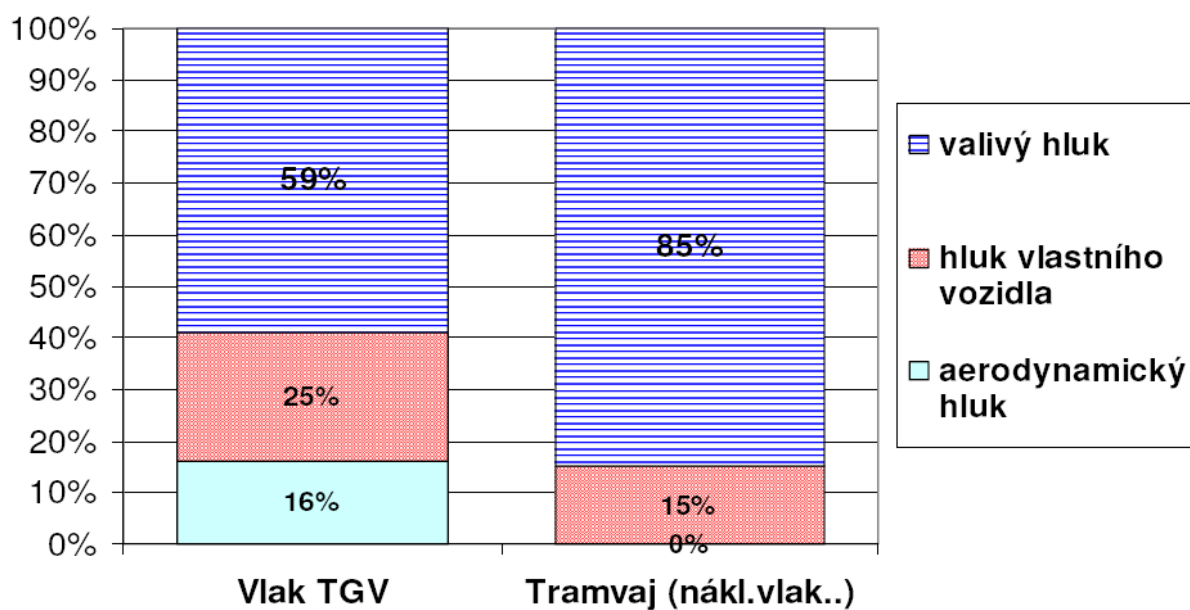
po mostech apod. Míra jeho rušivosti se špatně předpovídá. Některé lokální dopravní hluky jsou však často nezbytné pro bezpečnost provozu.

- **Aerodynamický hluk**

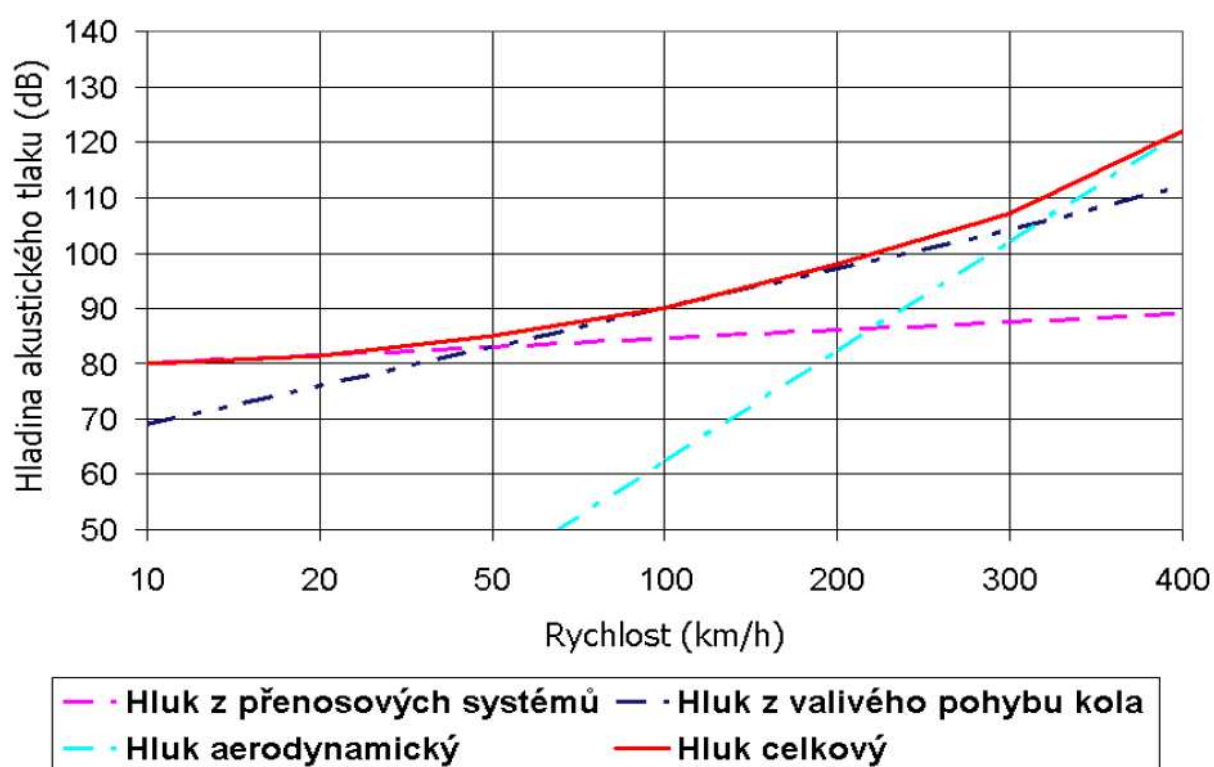
Aerodynamický hluk je dominantní při rychlostech nad 200 km/h (jiné zdroje však uvádějí, že toto tvrzení se neprokázalo. [1]) a v podmínkách tramvajové dopravy, kdy se vozy pohybují rychlostí do 60 km/h (viz Obr. 8), je proto zanedbatelný. Jeho podíl na hluku z provozu tramvajové dopravy je naprosto minimální a tudíž se mu tato práce dále nevěnuje.



Obr. 6. Výškové rozložení zdrojů hluku z elektrického kolejového vozidla



Obr. 7. Procentní složení emitovaného hluku



Obr. 8. Závislost hladiny akustického tlaku na rychlosti

2.1 Přenos zemního hluku do okolí

Cesta a princip šíření hluku vzduchem je poměrně jasně představitelná (viz. 4.3). Avšak cesty šíření zemního hluku zemním prostředím i druh a míra jeho účinků na okolní zástavbu závisí na řadě značně proměnných faktorů:

- Intenzita, frekvence a amplituda zvukových vln, vibrací a otřesů.
- Konstrukční uspořádání a stavební stav kolejového svršku.
- Existence umělých objektů a podzemních inženýrských sítí v traťovém spodku.
- Nehomogenity v podloží, mezi něž patří zejména nestejnoměrné zhuštění, geologická skladba podloží. Dále pak geologické a hydrogeologické poměry v podloží tratě a v okolním zeminovém/horninovém prostředí, stavebně-konstrukční provedení dotčených budov (způsob a hloubka založení, druh a stav svislých konstrukcí, odolnost konstrukce budovy proti rozkmitání – rezonanci).

2.2 Základní charakteristiky a specifika tramvajového provozu

Městské tramvajové dráhy mají oproti těm železničním jistá specifika vyplývající především z následujících provozních charakteristik.

- Návrhové nápravové zatížení 12 t, traťová rychlost do 50 km.h⁻¹ (výjimečně do 80 km.h⁻¹).
- Tratě v centru města jsou zatíženy až 320 nápravami/h resp. 3000 náprav/den.
- Špičkově zatížené úseky tratí až 480 náprav/h.
- Tramvajové vlaky jezdí v podstatně kratších intervalech než vlaky na železnici. V mimořádně zatížených úsecích v intervalu 90 až 120 s.
- Tratě pojížděny podélně i příčně nekojovou dopravou s nápravovým zatížením do 10 t.
- Tratě jsou vedeny uličním prostorem, a proto se tramvajová trať stává součástí městského prostředí. Z toho vyplývá vyšší důraz na estetiku povrchu tratě. Proto jsou tratě často stavěny se zákrytem. A to zákrytem tuhým (panely, asfaltové vrstvy, dlažba) nebo zákrytem netuhým (zatravnění).

- K pohybu kolejových vozidel v uličním prostoru často dochází v bezprostředním souběhu s chodníky. Díky tomu dochází k přímému kontaktu s nechráněným obyvatelstvem, z čehož vyplývá nutnost klást důraz na omezení hlučnosti provozu.
- Tratě jsou často vedeny hustě zastavěným územím, často v těsném sousedství zástavby, z toho vyplývá nutnost klást vysoký důraz na ochranu proti přenosu otřesů a vibrací.

3 Rozdělení možných opatření

Protihluková opatření se dělí na aktivní a pasivní. Aktivní opatření slouží ke snížení hlukové emise u zdroje, pasivní naopak k ochraně obyvatelstva před nadměrnou hlukovou zátěží. Aktivní opatření dělíme do následujících skupin dle jejich charakteru:

- Urbanistická
- Architektonická
- Dopravně-organizační
- Technická

Z důvodu omezeného rozsahu a zaměření se tato práce dále zaměřuje hlavně na opatření technická.

Bylo prokázáno, že až 80% akustické energie je vyzářeno do jednoho metru nad kolejnicí. Omezení nebo snížení hlukových emisí je nejúčinnější u zdroje. Z tohoto důvodu by nejúčinnější aktivní protihluková opatření měla být aplikována především na vozidlo a trať. Bohužel častokrát je volen způsob opačný tj. zřizování opatření pasivních. Tato bývají mnohdy řešením nejdražším a v praxi obvykle nejméně účinným. Budování protihlukových bariér nepřipadá díky vedení tramvajových tratí v intravilánu většinou v úvahu. Vybavení domů okny s vícevrstvého skla je rovněž opatření nákladné a málo účinné (funguje jen v případě, že okno je zavřené). Bývá zřizováno jako krajní opatření, když není možno snížit hluk z provozu tramvají jinak.

Opatření vedoucí ke snižování šíření hluku a vibrací lze rozdělit dle místa, respektive druhu zdroje hluku, na který jsou aplikovány. Je nezbytné si uvědomit, že ne všechna tato opatření lze aplikovat do všech míst tramvajových tratí nebo na všechny druhy tramvajových vozů. „Také typ tramvajové trati, její stav a údržba má velký vliv na množství hlukových emisí. Trať s otevřeným kolejovým svrškem, tramvajové křižovatky či oblouky s malým poloměrem budou vždy hlučnější (z hlediska hluku emitovaného vlastní jízdní dráhou), než např. trať zapuštěná ve vozovce, případně trať zatravněná.“ [9] Pro docílení co nejlepšího tlumícího efektu je nezbytné tato jednotlivá opatření vhodně kombinovat. K vytvoření vhodné kombinace z hlediska velikosti tlumícího efektu zejména vybízí to, že v tomto případě se jednotlivé prvky v součinnosti nechovají dle principu superpozice. Předpokladem je, že výsledný tlumící efekt není ve většině případů roven pouhé sumě jednotlivých tlumících efektů, ale v praxi bývá větší [23].

3.1 Protihluková a protivibrační opatření aplikovaná na vozidlo

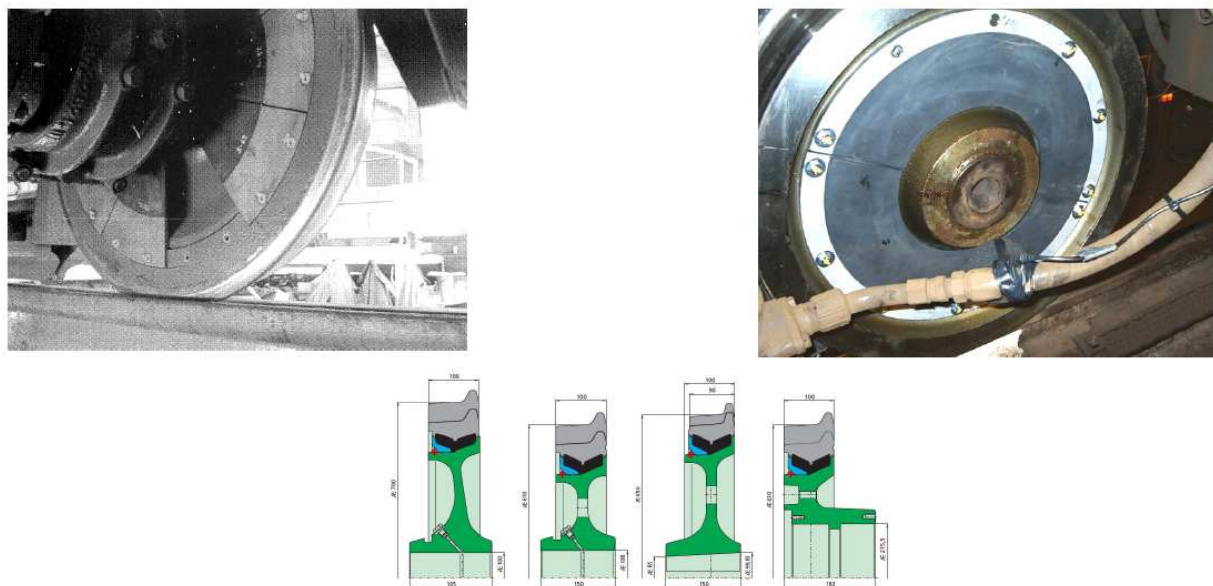
Tato práce nemá ambice hledat nejlepší řešení z hlediska konstrukce tramvajových vozidel. Z toho důvodu jsou tyto opatření popsána pouze stručně.

- **Optimalizace tvaru kola**

Optimalizací tvaru kola je možno minimalizovat vlastní hlukové i vibrační emise kola. Zde lze použít více postupů - Docílit osové symetrie kola (přímý kotouč, dovážení nesymetrie okolku), zavést menší průměr kola, neboť čím je menší průměr kola, tím je menší vyzařovací plocha a také zavést kotouče větší tloušťky, neboť čím je tlustší kotouč, tím je emisní spektrum na vyšší frekvenci a to i mimo slyšitelné pásmo. Dosažitelný útlum je od 2 dB (optimalizovaný tvar) do 10 dB (kolo průměru 540 mm se zesíleným kotoučem).

- **Protihlukové absorbéry na kolo**

Aplikací absorbérů přidáme hmotnost a zvýšíme tlumící koeficient, tím se jednak sníží vyzařování a jednak se přesune do vyššího frekvenčního pásma. Nejeefektivnější je využití laděných absorbérů, které jsou laděny na jednu nebo dvě rezonanční frekvence, takže se rezonanční špičky roznese do širšího pásma. Dosažitelný útlum je kolem 6 dB (Některé zdroje uvádějí útlum jen okolo 3 dB – měřeno za použití váhového filtru A. [23]).



Obr. 9. Kolo vozidla s akustickými tlumiči (absorbéry)

- **Stínící kryty na kolo**

Jejich použití není obecně příliš účinné. Velmi záleží na jejich upevnění, neboť hrozí riziko, že kryt bude po případném uvolnění produkovat další přídatný hluk. Další z nevýhod je nemožnost přímého přístupu k podvozku kolejového vozidla. Konkrétní hodnoty útlumu nejsou momentálně známy. Toto řešení je tedy po zvážení vhodné maximálně jako doplňkové.



Obr. 10. Příklad použití stínících krytů u vozů MIVB/STIB 3004 (Photo by Thomas van Berel – Brusel)

- **Detekce a broušení plochých kol**

Jedním z opatření, která je možné zavést bez velkých technologických nároků, je broušení tzv. „plochých kol“, neboli kol s ploškou vzniklou proklouznutím kola po kolejnici při prudkém brzdění. Smutnou skutečností je, že v mnoha dopravních podnicích se neklade dostatečný důraz na detekci a následné co nejrychlejší odeslání vozu s plochým kolem do depa k přebroušení. Ve chvíli, kdy je možné detekovat ploché kolo pouhým poslechem je většinou už pozdě a vozidlo již delší dobu rázy poškozuje trať i sebe a svým provozem generuje nadměrné množství hluku. Proto je vhodné instalovat do vybraných míst vhodně nastavené (tzn. dostatečně přísně stanovené limity) detektory plochých kol, které takto poškozený vůz identifikují. Následným přebroušením kola dochází ke snížení hluku v celé délce trati, na které je dané vozidlo provozováno, což je vzhledem k poměrně nízké ceně tohoto opatření (vzhledem k ostatním) velmi výhodné.

Pro dostatečnou účinnost tohoto opatření a zabránění zbytečnému zvýšení nákladů však nestačí jen ploché kola detekovat a brousit. Je nezbytné, aby řidiči tramvajových vozidel byli dostatečně proškoleni a v provozu dodržovali taková pravidla, kterými by minimalizovali pravděpodobnost vzniku plochého kola. Pokud nebudou dodržovány opatření jak na straně technické, tak provozní, není možné využít plný potenciál tohoto opatření. Vliv plochých kol je jasně patrný při měření vibrací na zkušebních úsecích na ulici Závodní (viz 5.2).

3.2 Protihluková opatření aplikovaná na trať

Z charakteru této práce vyplývá hledání nebo alespoň doporučení ideální kombinace těchto a následujících opatření (viz 3.3). Proto se jim budeme dále věnovat detailněji.

- **Kolejnicové podložky**

Jednou z aplikací, která snižuje úroveň hlukových emisí, jsou pružné kolejnicové podložky s definovanou tuhostí. Tuhost těchto podložek musí být taková, aby přenos energie z kolejnice do pražce byl rovnoměrný. Výhodou aplikace podložek s vyšší elasticitou je zlepšení přenosu zatížení z hlavy kolejnice, oddálení vzniku a zhoršování vlnkovitosti. Nezanedbatelný je rovněž přínos ke zvýšené pohodlnosti pro cestující. Příliš měkké podložky však způsobí vyzáření většiny energie z kolejnice a ty tímto emitují více hluku. Naopak podložky s nízkou elasticitou přenesou většinu této energie na pražec.

- **Kolejnicové absorbéry (bokovnice)**

Jsou jedním z odhlučňovacích prvků sloužících k zvýšení útlumu akustických vln. Bokovnice jsou segmenty pevně přiléhající ke stojině kolejnice. Svou materiálovou strukturou tlumí vliv valivého hluku. Fungují na principu obalení stojiny elastickým absorpčním materiálem. Jednou z nejčastěji používaných úprav je obložení stojiny kolejnice pryžovými pásy. Tyto konstrukce byly měřeny v terénu i v laboratoři a udávané snížení hladiny hluku je až o 10 dB a to dle materiálu a provedení.

V praxi se hodnota útlumu u nezakrytého svršku trati pohybuje okolo 5 dB, což je snížení významné, neboť útlum o 6dB představuje polovinu původní hodnoty. Měřením bylo rovněž prokázáno, že instalací bokovnic do úseků se zakrytým svrškem nedochází k žádné změně hlučnosti. Více viz 4.3.

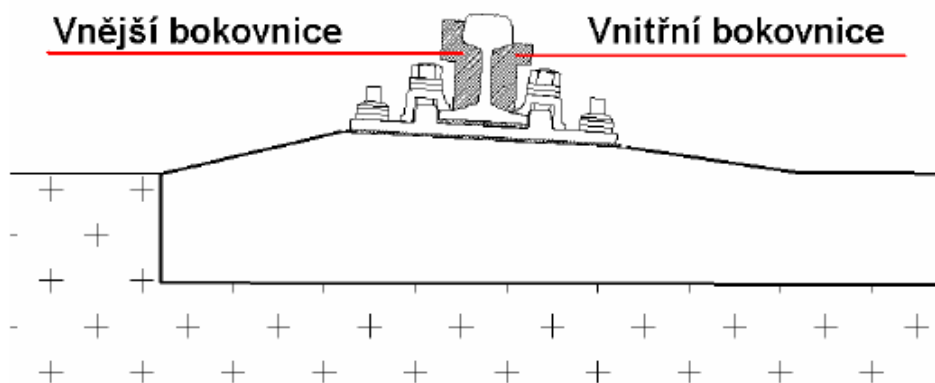
Bokovnice mají buď plný profil, nebo profil s otvory, vždy přesně tvarovaný do spojkové komory. Prvky bokovnic nesmí vyčnívat do průjezdného průřezu ani zabráňovat údržbě. Nesmí taktéž dojít k jejich odchlípnutí, odpadnutí a případnému zranění osob při průjezdu vozidel. Musí umožňovat kontrolu a výměnu kolejnic bez nutnosti je (bokovnice) zničit, či poškodit. Rovněž musí být možné je kdykoliv vyměnit.



Obr. 11. Pryžové kolejnicové absorbéry (bokovnice)

- **Pružný upínací systém**

Instalací pružných upínacích systémů nebyl zjištěn jejich vliv na snížení hlučnosti provozu tramvajové dopravy. Jejich vliv je v oblasti šíření vibrací. Pro zhodnocení jejich účinnosti je třeba provést další měření.



Obr. 12. Pryžové kolejnicové absorbéry (bokovnice) [9]

- **Broušení provozního opotřebení kolejnic**

Broušení provozního opotřebení kolejnic je založeno na odstraňování nerovností na povrchu pojížděné hrany kolejnic. Jelikož je až 85% celkové hlukové emise z tramvajové dopravy (Obr. 7) generováno na styku kolo – kolejnice interakcí nerovností, je jejich odstraňování jednou z důležitých metod snižování hluku z tramvajové dopravy. Pro co nejlepší účinek tohoto opatření je třeba provádět pravidelnou kontrolu a údržbu. Ne pouze odstraňovat jednotlivé rozvinuté vady. Toto opatření je možné aplikovat na jakýkoliv typ tramvajového svršku bez nutnosti výměny či rozebrání částí konstrukce. Při pravidelném broušení kolejnic dochází ke snížení hluku po celé délce broušeného úseku. Výsledky posledních měření jasně ukazují výhodnost aplikace tohoto opatření (Viz 4.7). Je výhodné aplikovat toto opatření společně s detekcí a broušením plochých kol tramvajových vozů.



Obr. 13. Provozní opotřebení kolejnic na ulici Závodní

3.3 Protivibrační opatření aplikovaná na trať

- **Tloušťka štěrkového lože**

Změna tloušťky v souvislosti s akustickými účinky není z hlediska protivibračních opatření podstatná. Přílišné zvětšení tloušťky kolejového lože by mohlo navíc vést k potížím se stabilitou a údržbou.

- **Tuhost kolejnicových podložek**

Měkké podložky nebo speciální pružné upevnění kolejnic mohou snížit velikost vybuzených vibrací. V současnosti je toto řešení používáno k ochraně štěrkového lože před vibracemi a ke zlepšení jízdního komfortu na tratích s velmi tuhým podložím. Je nutné najít podložky optimální tuhosti, aby byl zajištěn rovnoměrný přenos zatížení z kolejnice na pražec. Jak už bylo zmíněno výše, příliš měkké podložky zapříčiňují vyzáření většiny energie z kolejnice a ty tímto emitují více hluku. Je tedy nutné zvážit vhodnost tohoto opatření vždy dle podmínek konkrétního úseku, na kterém má být použito.

- **Kontinuálně podepřená kolej**

Tento typ trati má horší vlastnosti ohledně zpětně vyzářeného hluku než klasická trať se štěrkovým ložem. Na druhé straně menší opotřebení oběžných ploch a nepřítomnost periodického buzení způsobí redukci na nízkých frekvencích. Snížení zpětně vyzářeného hluku může být dosaženo vhodným odpružením kolejniče.

- **Odpružené pražce**

Podložení pražce elastickým povrchem může být realizováno na trati se štěrkovým ložem i bez něho. Při uložení na štěrkové lože i při použití bez štěrkového lože (systém "Modurail") je možno pozorovat značné snížení hladin vibrací, ovšem pouze na vyšších frekvencích. Nevýhodou jsou zvýšené vibrace samotného pražce, zejména na trati se štěrkovým ložem, což opět vede ke zvýšeným hladinám venkovních hlukových emisí.

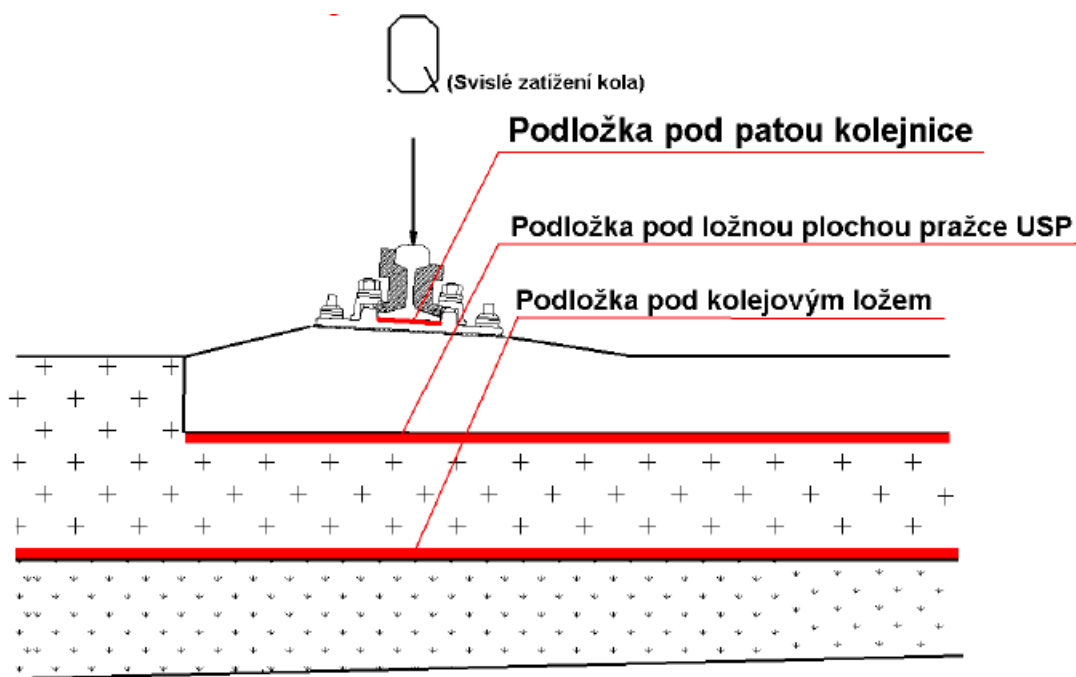


Obr. 14. Umístění pružné podložky na ložné ploše pražce

- **Rohože pod kolejové lože**

Rohože pod štěrkové lože byly v minulosti poměrně často používaný prostředek pro snížení vibrací. Jedním z důvodů byla poměrně nízká cena. Velmi důležité jsou ověřovací laboratorní zkoušky životnosti těchto rohoží. Efektivní použití rohoží pod kolejový svršek velmi závisí na parametrech podloží. Podle kvality podloží je nutno doladit správné parametry

rohože (tuhost, tloušťka, velikost ok, apod.). Vždy by mělo být zkoumáno dynamické chování systému, kvůli stabilitě trati. Podle naměřených i vypočtených hodnot nejvyšší ztrátový činitel kolem 20 dB je na vyšších frekvencích kolem 60 Hz, kdežto na nízkých frekvencích asi 20 Hz může vibrace dokonce zesilovat (5 dB).



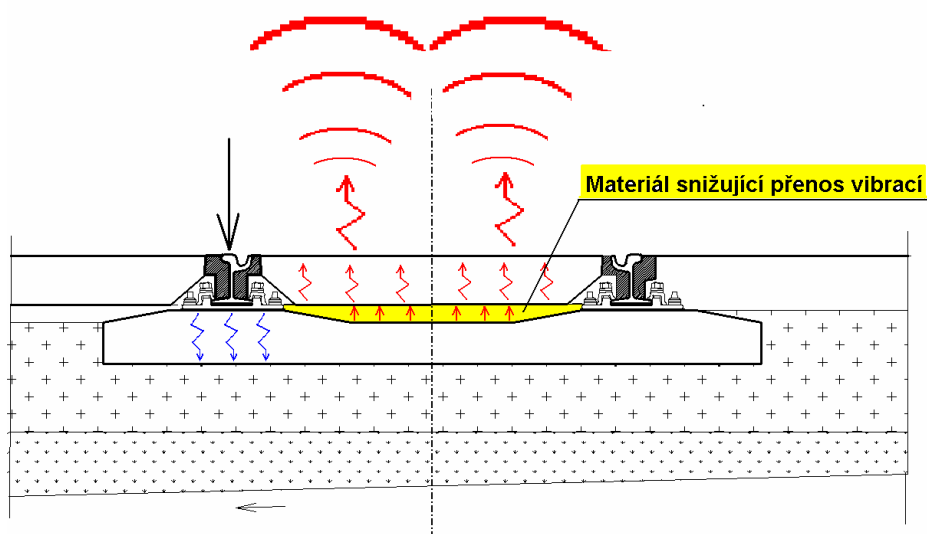
Obr. 15. Podložky v konstrukci tratě [9]



Obr. 16. Realizace podložky pod kolejovým ložem (Praha – Vodičkova ulice)

- **Odpružení na styku zádlažbového panelu a kolejnicových podpor**

Vibrace přenášené z kolejnicových podpor mohou být zdrojem sekundárního hluku. Této tématice se tato práce dále zabývá později (viz 4.6). Doporučuje se proto použití elastického materiálu do prostoru mezi pražec a zákrytový panel (Obr. 17).



Obr. 17. Opatření k zamezení přenosu vibrací z kolejové podpory do zákrytového panelu [9]

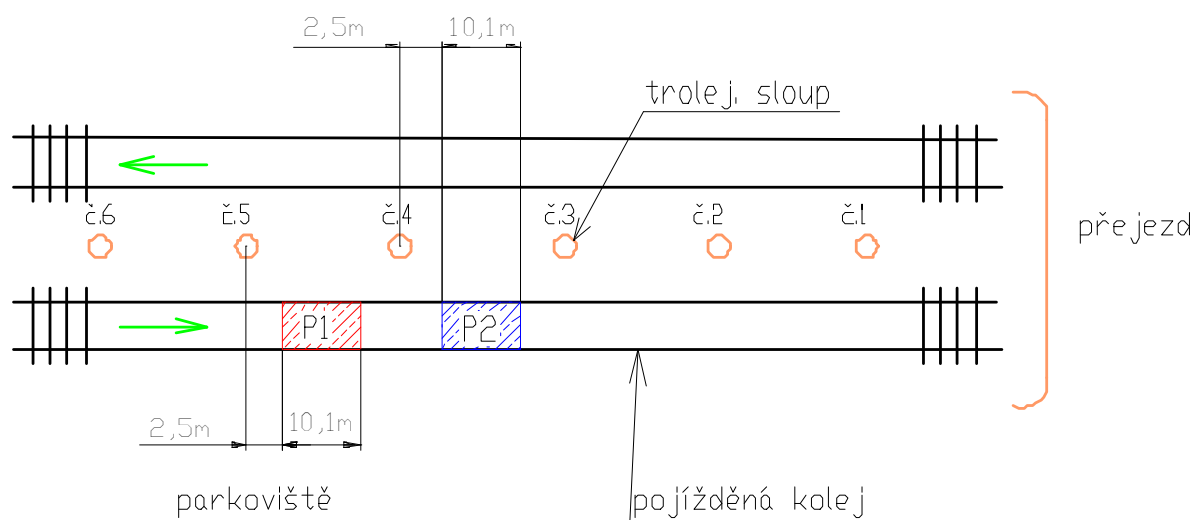
4 Současná opatření u DP Ostrava

V minulých letech realizoval DPO a.s. ve spolupráci s Katedrou částí a mechanismů strojů Fakulty strojní VŠB – TUO několik specificky zaměřených akcí, které sledovaly ověření účinnosti dílčích opatření na konstrukci tramvajových tratí s cílem dosáhnout snížení hluku a vibrací. Popis jednotlivých opatření i stručné výsledky z nich vyplývající jsou vypsány níže a řazeny chronologicky. Tato práce se z důvodu tematického zaměření a aktuálnosti detailněji zaměřuje na poslední tři z těchto měření (viz 4.5, 4.6 a 4.7).

V následujících podkapitolách je stručný popis měření různých fyzikálních veličin na tramvajových tratích klasických konstrukcí (otevřená a zakrytá trať) absolvovaných převážně pro DPO a.s. za různým účelem. Měření provedla Katedra částí a mechanismů strojů Fakulty strojní VŠB-TUO v letech od 2001 až 2009. Dle požadavků objednatele byly vyhodnocovány buď jen efektivní hodnoty, nebo maxima. V některých případech byly prováděny spektrální analýzy hluku a vibrací. Proto se rozsah měřených veličin i hloubka jejich zpracování dosti liší. Zmapování chování jednotlivých upínacích systémů a dalších doplňků jak z hlediska hluku, tak vibrací či roznosu kolové síly tedy není úplné.

4.1 Ostrava – Martinov 2001, Betonový pražec SB8 s pružnou ložnou plochou

Na základě objednávek Gumárny Zubří, a.s. a DPO a.s. byla v listopadu 2001 provedena funkční zkouška betonového pražce SB8 (podkladnicový upínací systém) opatřeného pružnou ložnou plochou. K tomuto účelu byl v rámci plánované opravy tratě zřízen zkušební úsek mezi zastávkami „Dílny DPO“ a „Martinov“. Zkušební úsek byl rozdělen na úsek P1 (standardní pražce) a úsek P2 (pražce s pružnou ložnou plochou). Délka každého úseku byla 10,1 m.



Obr. 18. Uspořádání zkušebních úseků P1 a P2 [3]

Hlavním cílem zkoušek bylo zjistit, zda pružná ložná plocha pražce umožní dosáhnout snížení vibrací přenášených do tratě a jejího blízkého okolí. Současně byl sledován vliv této plochy na tramvaj (vibrace podvozků, vibrace podlahy) a na ohyb pražců.



Obr. 19. Umístění pružné podložky na ložné ploše pražce [3]

4.1.1 Metodika měření

Měření dynamické odezvy bylo provedeno s „brousící“ tramvají typu T3 projíždějící rychlostí 50 ± 2 km/h v obou směrech zkušebními úseky P1 a P2. Měření bylo provedeno 2 týdny od uvedení tratě po opravě do provozu. Tramvaj byla uvnitř zatížena přídatnou zátěží o hmotnosti 5,056 t., statická kolová síla dosáhla hodnoty 3,007 t. Měření hluku nebylo prováděno z důvodu malé délky obou úseků P1 a P2.



Obr. 20. Brousící tramvaj na zkušebním úseku tratě [3]

4.1.2 Výsledky měření

Funkční zkoušky pryžových podložek s pružným dezénem pod hlavami pražců umožnily získat informace potřebné pro účinnější řešení problematiky negativních účinků tramvajové dopravy. Výsledky měření při funkčních zkouškách prokázaly, že pružná ložná plocha pražce poskytuje řešení pro snížení negativních účinků vibrací z tramvajové dopravy. Bylo doporučeno provedení laboratorních dynamických zkoušek a měření ve zkušebním úseku pro následné možné doporučení k instalaci do tramvajových tratí. Nakonec však bylo od použití

těchto pražců upuštěno a v současné době se pražce SB8 nevyrábějí. U DPO a.s. se místo nich budou používat pražce B03.

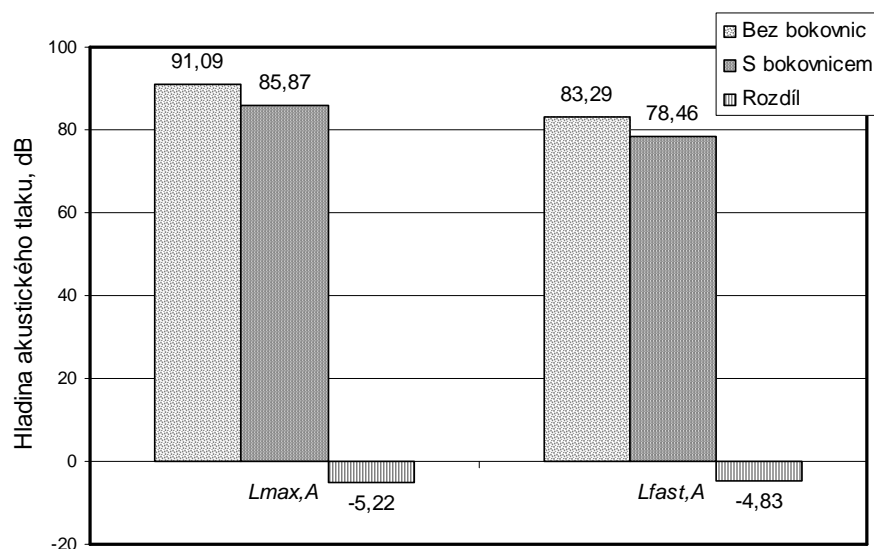
4.2 Ostrava – Poruba 2004, Pryžové bokovnice

Na základě požadavku DPO a.s., odbor Vrchní stavba byl změřen hluk při průjezdu tramvaje úsekem tratě na ul. Opavské. Měření bylo prováděno v úseku tramvajové tratě na ul. Opavské mezi zastávkami 17. listopadu a Vozovna Poruba směrem do centra Ostravy. V tomto úseku byla naplánována instalace bokovnic za účelem snížení hluku z tramvajové dopravy vyzařovaného do okolí tratě. Účelem měření bylo srovnat úroveň hluku před a po instalaci bokovnic a určit tak jejich vliv na snížení hlučnosti.

4.2.1 Metodika měření

Měření hluku probíhalo vždy v nočních hodinách (od 23. hodiny), před instalací bokovnic dne 1. 6. 2004 a po instalaci dne 29. 6. 2004. Kontrolní tramvaj typu K2 projížděla rychlostí 40 ± 1 km/h. Hluk byl snímán pomocí zvukoměru typu 2232 firmy Brüel&Kjaer. Výstup ze zvukoměru ve formě hodnoty akustického tlaku s filtrem typu A. Z naměřených hodnot byly vyhodnoceny průměrné hodnoty hladin akustického tlaku před a po instalaci bokovnic (viz Obr. 21).

4.2.2 Výsledky měření



Obr. 21. Srovnání průměrných hodnot hladin akustického tlaku před a po instalaci bokovnic [5]

Z frekvenčních spekter akustického tlaku na obr. 22 a 23, je patrné, že instalací bokovnic nedošlo k frekvenčnímu posunu dominantní složky hluku, ta je cca 262,5Hz, ale výrazně se snížila její úroveň. Dominantní složka pohybující se okolo 260 Hz je významná a tato práce se jí bude dále zabývat později (viz 5.1.1)

„Jak je patrné z předchozích stránek, instalací bokovnic na kolejnice v úseku tramvajové tratě na ul. Opavské došlo ke snížení hladiny akustického tlaku o 5,22 (případně o 4,83) dB. Pokud si uvědomíme, že snížení hluku o 6dB představuje pokles na polovinu předchozí hodnoty, je toto snížení významné.“ [5]



Obr. 22. Frekvenční spektrum před instalací bokovnic [5]



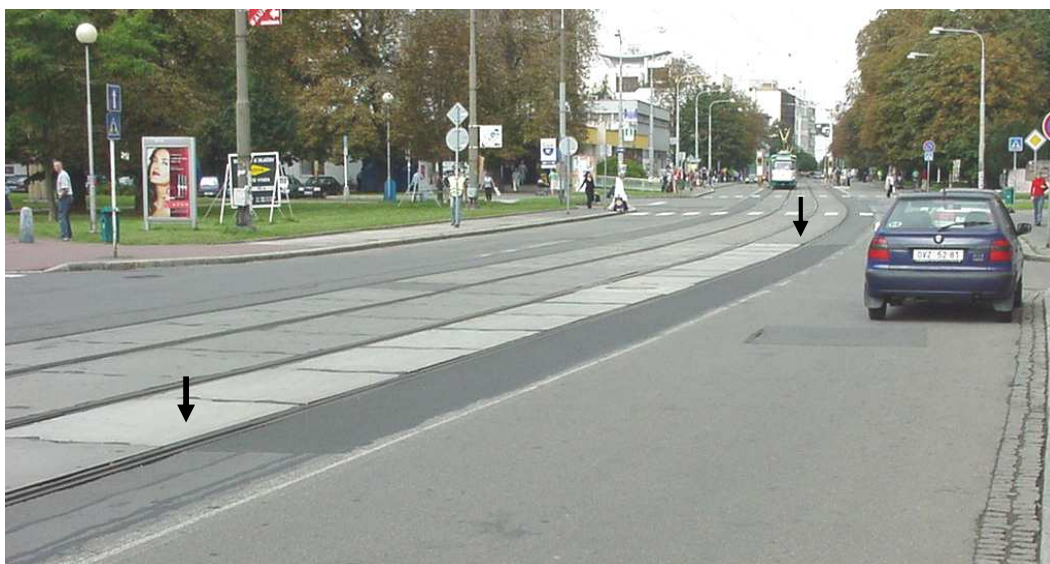
Obr. 23. Frekvenční spektrum po instalaci bokovnic [5]

4.3 Ostrava - Centrum 2005, Pryžové bokovnice instalované do zakrytého svršku

Na základě požadavku DPO a.s., bylo v noci z 19. na 20. září 2005 provedeno měření hluku na ulici Nádražní. Účelem tohoto měření bylo zjistit přínos bokovnic instalovaných do zakrytého svršku na útlum hluku z tramvajové dopravy. Při měření byla snímána celková úroveň hluku v dané lokalitě při průjezdu referenční tramvaje měřicím místem. Měřena byla rovněž úroveň hluku na pozadí.

4.3.1 Metodika měření

Měřený úsek trati leží na ul. Nádražní asi 50 m za křižovatkou ulic Nádražní a Českobratrská směrem do Přívozu. Obě kolejnice pravé koleje jsou ve 30ti-metrovém úseku osazeny bokovnicemi. (viz Obr. 24) Jednalo se o srovnávací měření hluku při průjezdu referenční tramvaje typu T3 rychlostí 30 km/h a 40 km/h 30 m úsekem osazeným bokovnicemi a úsekem bez bokovnic.



Obr. 24. Pohled na úsek trati směrem do Přívozu osazený bokovnicemi, začátek a konec úseku označen šipkami. [4]

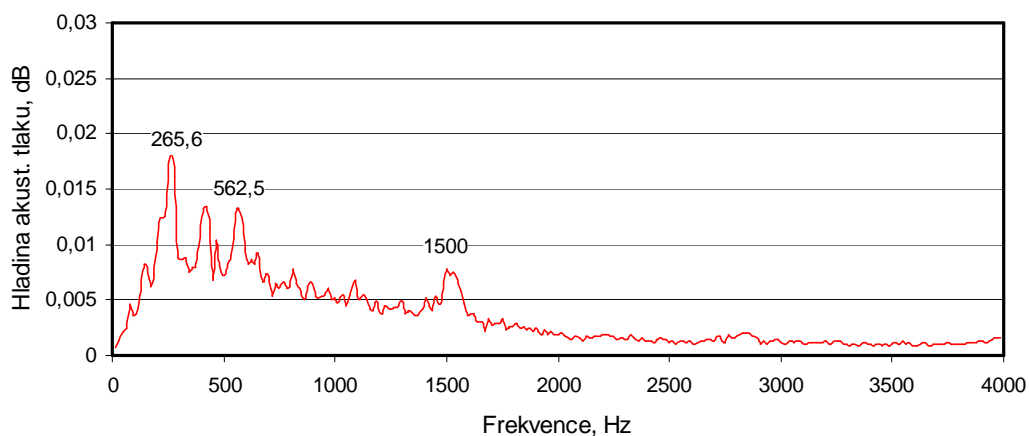
4.3.2 Výsledky měření

	Soubor	podvozek	Maximální hladina akustického tlaku $L_{A,max,fast}$ [dB]	Ekvivalentní hladina akust. tlaku $L_{eqt,A}$ [dB]
Úsek s bokovnicemi	003	první	76,763	73,361
		druhý	76,208	
	004	první	77,904	75,499
		druhý	78,040	
	005	první	78,238	75,793
		druhý	79,179	
	006	první	77,755	75,865
		druhý	78,086	
	Průměr		77,772	75,129
Úsek bez bokovnic	011	první	78,208	75,866
		druhý	78,642	
	012	první	78,038	73,905
		druhý	77,514	
	013	první	76,905	74,001
		druhý	77,368	
	014	první	77,529	75,661
		druhý	77,127	
	Průměr		77,666	74,858

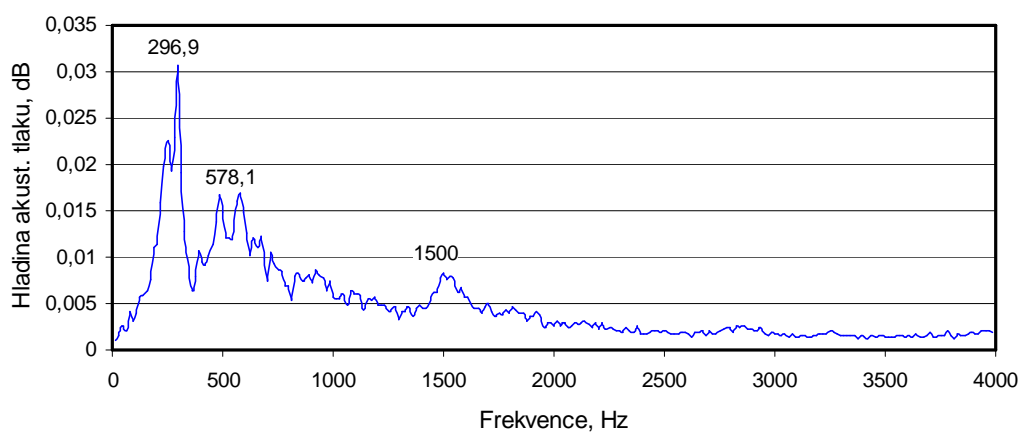
Tabulka 1: Maximální a ekvivalentní hladiny akust. tlaku pro průjezd rychlostí 30 km/h. [4]

	Soubor	podvozek	Maximální hladina akustického tlaku $L_{A,max,fast}$ [dB]	Ekvivalentní hladina akust. tlaku $L_{eqt,A}$ [dB]
Úsek s bokovnicemi	007	první	80,027	74,061
		druhý	80,769	
	008	první	81,236	78,357
		druhý	81,650	
	009	první	80,408	77,901
		druhý	82,377	
	010	první	82,134	78,758
		druhý	81,920	
	Průměr		81,315	77,269
Úsek bez bokovnic	015	první	80,886	77,050
		druhý	81,581	
	016	první	81,152	77,881
		druhý	80,819	
	017	první	82,174	78,380
		druhý	81,807	
	018	první	82,033	77,730
		druhý	81,211	
	Průměr		81,458	77,760

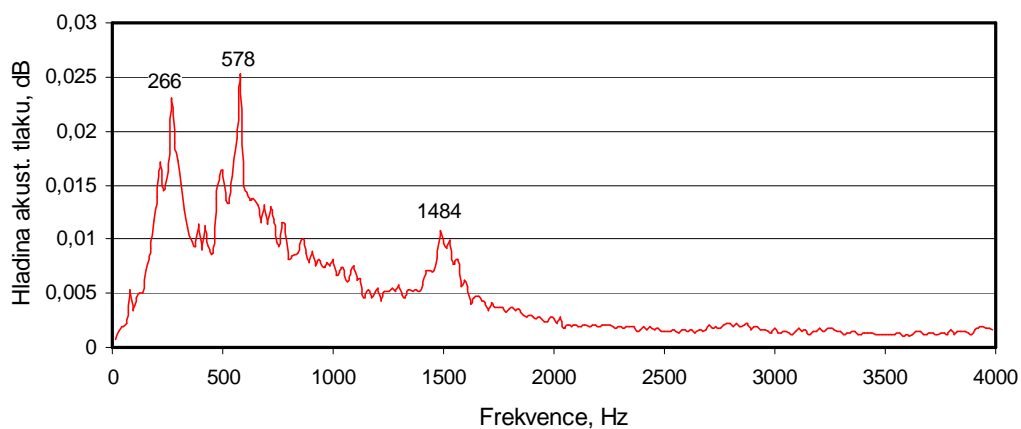
Tabulka 2: Maximální a ekvivalentní hladiny akust. tlaku pro průjezd rychlostí 40 km/h. [4]



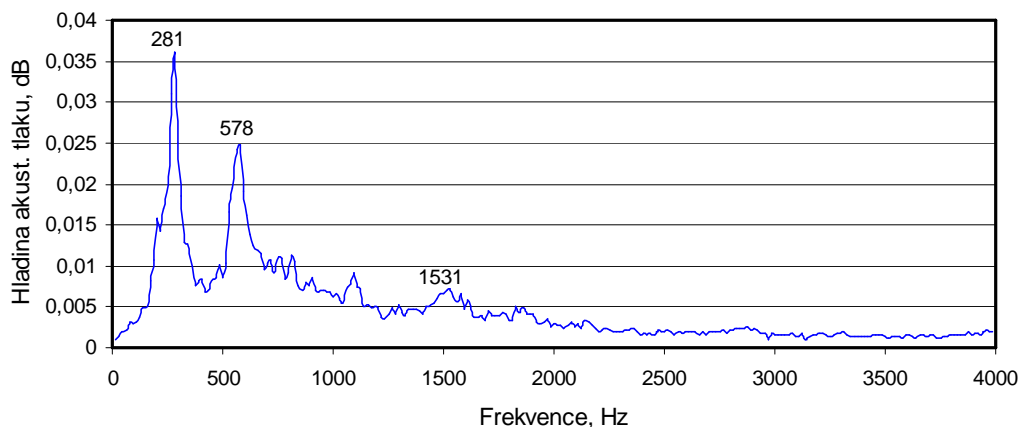
Obr. 25. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem s bokovnicemi rychlostí 30 km/h [4]



Obr. 26. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem bez bokovnic rychlostí 30 km/h [4]



Obr. 27. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem s bokovnicemi rychlostí 40 km/h [4]



Obr. 28. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem bez bokovnic rychlostí 40 km/h [4]

„Ze srovnání hodnot akustického tlaku [dB] z tabulky 1 a 2 a spekter jednotlivých záznamů pro úsek s bokovnicemi a bez bokovnic pro obě rychlosti jízdy vyplývá, že instalací bokovnic nedošlo k žádné změně v hlučnosti z tramvajové dopravy. Při důkladnější analýze spekter si naopak můžeme povšimnout výrazného nárůstu vyšších frekvencí (zejména při rychlostech průjezdu 40 km/h), které jsou lidským uchem vnímané silněji než frekvence nižší.“ [4] Opět je ale vhodné si povšimnout dominantní složky frekvenčního spektra okolo frekvence 260 Hz.

4.4 Ostrava – Dubina 2008, různé upínací systémy

Na základě požadavku objednatele, Dopravního podniku Ostrava, a.s., proběhlo dne 5. června 2008 měření hluku, vibrací a posuvů ve zkušebním úseku tramvajové tratě na ulici Horní v Ostravě-Dubině (Obr. 31). Cílem bylo na základě změřených hodnot hluku, vibrací a vertikálních a horizontálních posuvů kolejnice vzájemně srovnat 3 různé kombinace upínacího systému a podložek pod kolejnicí.

Zkušební úsek tramvajové tratě byl rozdělen na 3 dílčí měřené úseky lišící se typem instalovaného upínacího systému a podložek pod kolejnicí, resp. podkladnicí.

- **Úsek 1**

Na pražcích typu BO3 zde byl instalován pružný upínací systém Fast Clip firmy Pandrol v kombinaci s podložkami pod kolejnicí z materiálu EVA tl. 9 mm (Obr. 29). Délka úseku činila 40 m.



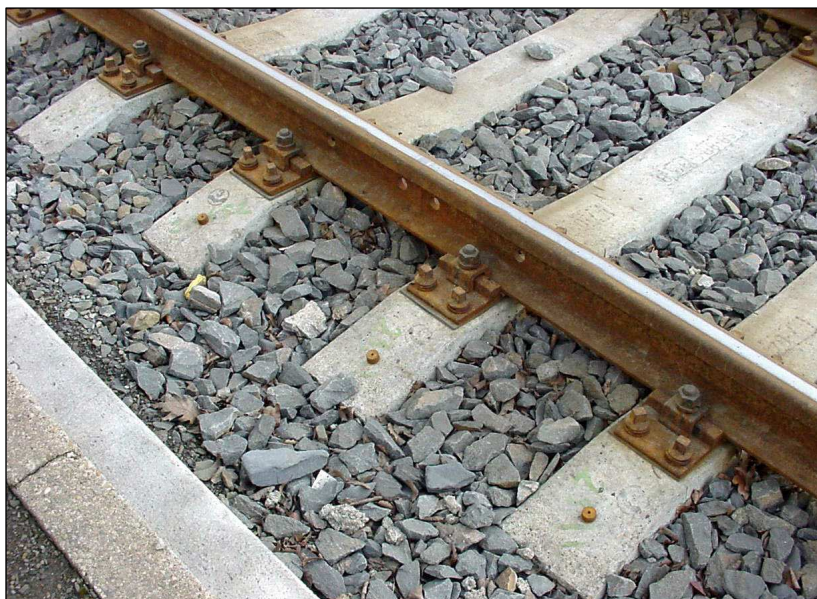
Obr. 29. Úsek 1 – aplikace pružného upínacího systému Pandrol Fast Clip [6]

- **Úsek 2**

Na protější koleji v opačném směru do centra Ostravy byl instalován také pružný upínací systém Fast Clip na pražcích typu BO3, ale tentokrát spolu s tvarovanými pryžovými podložkami (tl. 10 mm) pod kolejnicí. Délka tohoto úseku činila také 40 m.

- **Úsek 2**

Byl použit jako referenční a byl vymezen v části tramvajové tratě úseku Dubina-Dubinka s pražci SB8 s tuhým podkladnicovým upínacím systémem tvořeným svěrkou ŽS4 a pryžovou podložkou pod kolejnicí (tl. 8 mm) a pod podkladnicí (tl. 4 mm, obě podložky - Gumárny Zubří a.s.). Tento úsek byl uveden do provozu v závěru roku 2005 a jeho délka výrazně přesahovala 40 m.



Obr. 30. Úsek 3 – původní stav tramvajového svršku [6]

4.4.1 Měřicí zařízení a metodika měření

Hluk byl snímán zvukoměrem typu 2250B firmy Brüel&Kjaer ve formě hodnot okamžitého akustického tlaku p_{CA} , s frekvenčním vážením A.

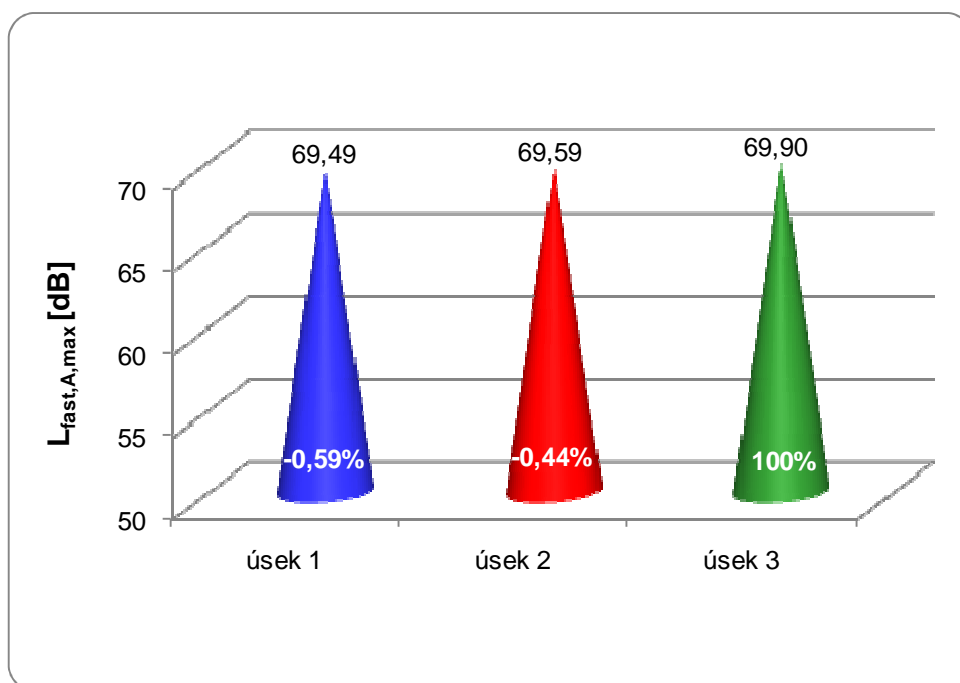
Z naměřených hodnot akustického tlaku p_{CA} , byly přepočtem získány hodnoty maximální hladiny akustického tlaku pro jednotlivé průjezdy referenční tramvaje, z nichž byla stanovena střední hodnota (Obr. 32). Zvukoměr byl během měření umístěn na stativu ve výšce 1,2 m nad okolním terénem ve vzdálenosti 21,25 m od osy pojížděné koleje, kolmo na ni (Obr. 31).



Obr. 31. Umístění zvukoměru pro měření hluku [6]

Při průjezdu referenční tramvaje byly rovněž měřeny vibrace kolejnice, pražce a blízkého terénu a také snímán vertikální posuv paty kolejnice vůči hlavě pražce na pěti po sobě jdoucích pražcích (Výsledky tohoto měření nejsou dále uvedeny, neboť se přímo netýkají tématu této práce). Měření sloužilo mimo jiné k vyhodnocení roznosu kolové síly na jednotlivé pražce. Pro podrobnější informace odkazují na zprávu z tohoto měření.

4.4.2 Výsledky měření



Obr. 32. Maximální hladiny akustického tlaku $L_{fast,A,max}$ [dB] pro jednotlivé měřené úseky [6]

Hodnota maximální hladiny akustického tlaku na úsecích 1 a 2 byla srovnatelná s hodnotou naměřenou v referenčním úseku (úsek 3). Z toho vyplývá, že se změnou systému uložení a upnutí kolejnice nedošlo k podstatné změně hlukových poměrů.

	vibrace a , $m.s^{-2}$		
soubor č.	kolejnice	pražce	terénu
68	29,658	52,995	0,024
70	27,914	52,054	0,022
74	27,026	48,812	0,021
75	28,794	53,164	0,021
77	28,159	48,439	0,022
78	27,57	46,221	0,022
stř. hodnota	28,187	50,281	0,022

Tab. 3. Výsledky měření vibrací na úseku 1 [6]

	vibrace a , $m.s^{-2}$		
soubor č.	kolejnice	pražce	terénu
82	35,849	12,061	0,045
85	36,416	12,072	0,042
86	34,027	13,061	0,045
87	36,463	13,331	0,042
stř. hodnota	35,689	12,631	0,044

Tab. 4. Výsledky měření vibrací na úseku 2 [6]

	vibrace a , $m.s^{-2}$		
soubor č.	kolejnice	pražce	terénu
92	57,404	24,543	0,055
93	54,245	24,100	0,055
94	54,514	23,449	0,057
95	54,479	23,498	0,056
stř. hodnota	55,161	23,898	0,056

Tab. 5. Výsledky měření vibrací na úseku 3 [6]

„Při přechodu z původního systému (úsek 3) na pružný systém s pryžovou podložkou (úsek 2):

- **vibrace kolejnice klesly** z 55,161 $m.s^{-2}$ na 35,689 $m.s^{-2}$, tj. o 35,3 %
- **vibrace pražce klesly** z 23,898 $m.s^{-2}$ na 12,631 $m.s^{-2}$, tj. o 47,15 %

Při přechodu z původního systému (úsek 3) na pružný systém s podložkou EVA (úsek 1):

- **vibrace kolejnice klesly** z $55,161 \text{ m.s}^{-2}$ na $28,187 \text{ m.s}^{-2}$, tj. o 48,9 %
- **vibrace pražce stouply** z $23,898 \text{ m.s}^{-2}$ na $50,281 \text{ m.s}^{-2}$, tj. o 110,4 %

Při přechodu z pružného systému s podložkou EVA (úsek 1) na pružný systém s pryž. podložkou (úsek 2):

- **vibrace kolejnice stouply** z $28,187 \text{ m.s}^{-2}$ na $35,689 \text{ m.s}^{-2}$, tj. o 26,6 %
- **vibrace pražce klesly** z $50,281 \text{ m.s}^{-2}$ na $12,631 \text{ m.s}^{-2}$, tj. o 74,9 %“ [6]

Jak je možné vidět na Obr. 32, aplikace pružných upínacích systému nemá vliv na maximální hodnoty akustického tlaku z provozu tramvajové dopravy. Mají však vliv na množství a velikost vibrací.

4.5 Ostrava - Hrabůvka 2008, pryžové rohože na zádlážbových panelech

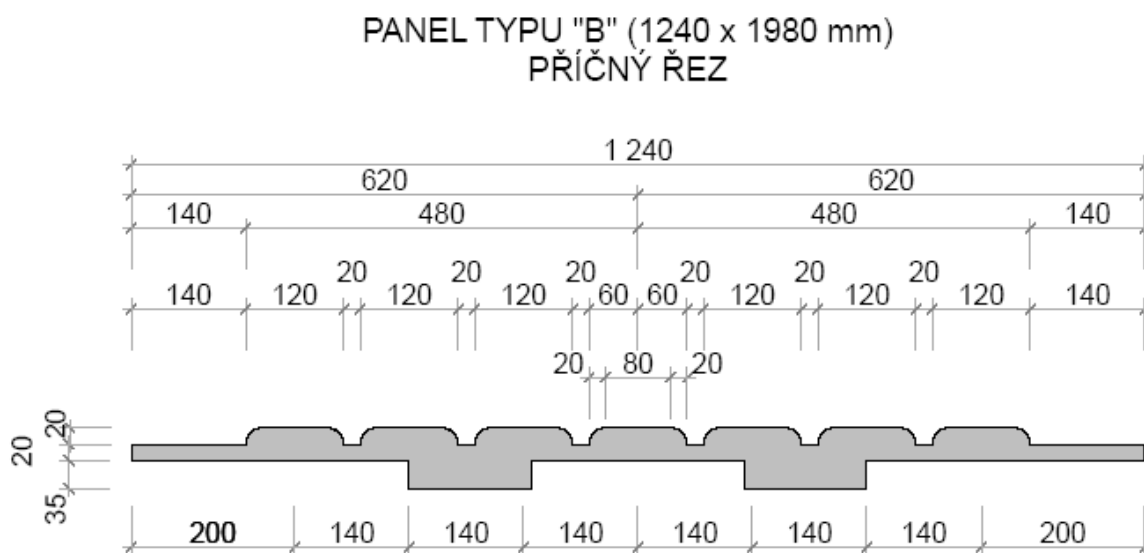
Na základě požadavku objednatele, Katedry prostředí staveb a TZB – 229 Stavební fakulty VŠB-TUO a ve spolupráci s DPO a.s., proběhlo ve dnech 28. srpna a 8. října 2008 měření hluku na ulici Závodní v Ostravě - Hrabůvce. První měření bylo provedeno pro původní stav tramvajové tratě, druhé měření proběhlo po výměně původních zádlážbových panelů za upravené panely s pryžovou vrstvou.

Jako zkušební úsek byl vybrán úsek tratě o délce 50 m na ulici Závodní v Ostravě-Hrabůvce. Úsek byl z hlediska měření vhodný, neboť je z obou stran lemovaný jednoproudovou silniční komunikací, travnatými pruhy a ploty zahrad rodinných domů na jedné straně a plotem městského hřbitova na straně druhé. V travnatých pruzích a za nimi směrem od tratě se nacházejí vzrostlé stromy, v době měření olistěné.

V daném úseku byly stávající betonové zákrytové panely nahrazeny novými panely s vrchní profilovanou pryžovou vrstvou (Obr. 34). Výpočet panelu byl optimalizován, čímž

bylo umožněno snížení konstrukční výšky panelu (ze 170 mm na 150 mm) a přidání vrstvy z recyklované pryže. Jako maximální tloušťka pryžové vrstvy byla navržena tloušťka 40 mm (limitováno průjezdním profilem tramvajového vozu). Pryžová vrstva byla profilována z důvodu „rozbití“ odraženýho se hluku z provozu kolejového vozidla. Tím mělo být dosaženo snížení množství odraženého hluku oproti klasickému betonovému zákrytovému panelu používanému na úsecích pojížděných nekolejovou dopravou.

V rámci úpravy zádlahového panelu bylo řešeno i vzájemné spojení pryžové vrstvy s betonovým panelem. Vzhledem k možnému smykovému namáhání panelu od brzdných a rozjezdových sil vozidel, byla pro zajištění lepší přídržnosti pryžové vrstvy k podkladu navržena varianta úpravy stykové plochy obou materiálů. Spodní hrana pryžové vrstvy byla opatřena ozuby, které po zabetonování panelu vytvoří v betonové části niky (Obr. 33).



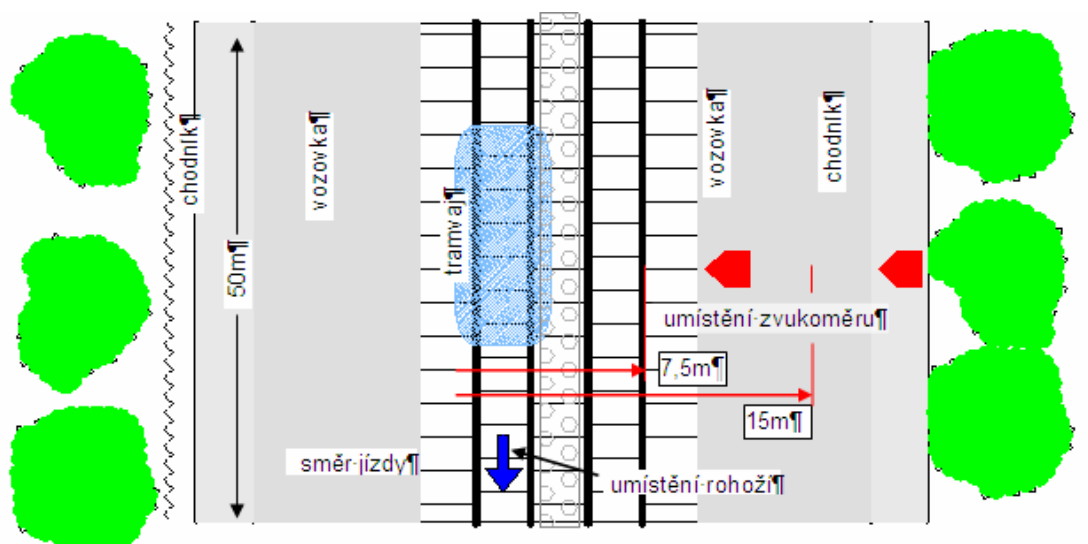
Obr. 33 Příčný řez pryžovou deskou [9]

Pro prostorové oddělení tramvajových tratí vedených v silniční komunikaci bylo provedeno položení zkušebního úseku zvýšených betonových tvarovek – tzv. betonových kolejových obrubníků. Jako vhodný typ byl vybrán výrobek společnosti Stavby silnic a železnic, a.s. Praha (Na Obr. 34 vlevo).



Obr. 34. Základňové panely s pryžovou profilovanou vrstvou – ul. Závodní. [9]

Cílem měření, jež provedla Katedra částí a mechanismu strojů, Fakulty strojní, VŠB-TU Ostrava, bylo ověření vlivu změny absorpčních vlastností povrchu základňových panelů s povrchovou úpravou z recyklované pryže na hladinu hluku od tramvajové dopravy.



Obr. 35. Schéma zkušebního úseku [9]

4.5.1 Měřicí zařízení a metodika měření

K měření hluku byl použit zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer, kterým byly snímány a zaznamenávány okamžité hodnoty akustického tlaku p_A [Pa] s váhovým filtrem A po dobu průjezdu referenční tramvaje měřeným úsekem. Délka časového záznamu akustického tlaku byla $T = 8$ s. Záznamy jednotlivých jízd byly uloženy do paměti počítače se vzorkovací frekvencí 10 kHz. Kalibrace zvukoměru byla provedena 28. 11. 2007.



Obr. 36. Zvukoměr typu 2250B s příslušenstvím. [9]

Měření probíhalo vždy v nočních hodinách, od 23:30. Provoz na okolních komunikacích byl velmi malý. Měřeny byly jen ty průjezdy referenční tramvaje, které nebyly rušeny jinou dopravou. V klidovém stavu před a po měření byla zaznamenána také hladina hluku pozadí. Její hodnota byla vždy o více než 10 dB nižší, v souladu s požadavky nařízení vlády č. 148 „o ochraně osob před nepříznivými účinky hluku a vibrací“ z 15. března 2006.

Zvukoměr byl během měření umístěn na stativ v horizontální poloze ve výšce 1,1 m nad vozovkou a okolním terénem tak, aby se mezi ním a referenční tramvají nenacházela žádná překážka. Měření hluku tedy probíhalo ve volném hlukovém poli. Na mikrofonu zvukoměru byla nasazena větrná clona z měkčeného PUR.

Pro rychlosti průjezdu 40 a 50 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\pm 2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) bylo měřeno ve dvou různých vzdálenostech zvukoměru od osy pojížděné koleje (7,5 a 15 m). Měřeno bylo vždy 5 průjezdů referenční tramvaje měřeným úsekem (Obr. 14). Měřeným úsekem projížděla tramvaj pouze setrvačností, bez brzdění, či akcelerace.



Obr. 37. Referenční tramvaj - měřicí vůz typu T3 ev. č. 8208 DPO, a.s [9]

Z naměřeného záznamu okamžité hodnoty akustického tlaku $p_{A,8s}$ byla poté vyhodnocena hladina akustického tlaku L_{Afast} [dB] a z 15 nejvyšších hodnot (v časovém úseku 4 s) vypočtena ekvivalentní hladina akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ [dB]. Dále byla vyhodnocena výsledná ekvivalentní hladina akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ [dB] jako střední hodnota z pěti záznamů.

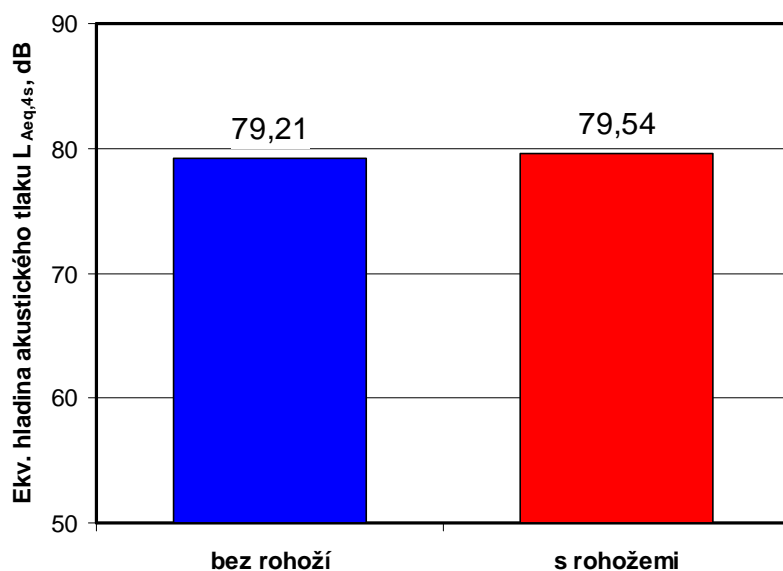
„Dále byla vyhodnocena amplitudová spektra reprezentativních záznamů ve frekvenčním pásmu od 0 do 5 000 Hz a z frekvenčního pásma 500 až 5 000 Hz pro posouzení účinků hluku z hlediska ergonomických a hygienických kritérií, kdy hluk ve frekvenčním pásmu okolo 1 000 Hz je lidským uchem vnímán nejvíce. V těchto frekvenčních rozsazích byly také stanoveny ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ a $L_{Aeq,4s,cut}$ (ekvivalentní hladina akustického tlaku ze záznamu akustického tlaku s hornopropustným filtrem 500 Hz).“ [9]

4.5.2 Výsledky měření

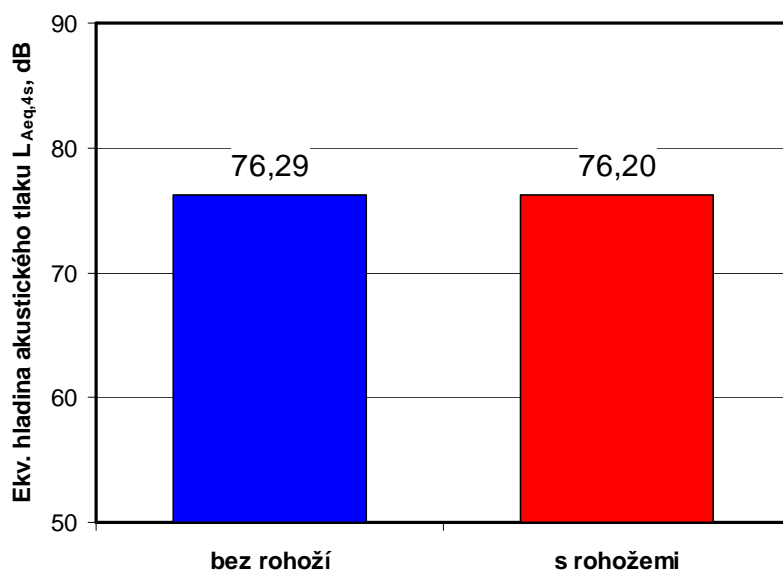
V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny výsledky měření a jejich hodnocení pomocí ekvivalentních hladin hluku a spektrální analýzy hladin akustického tlaku jak ve frekvenčním pásmu 0 – 5 kHz, tak i v pásmu 500 Hz – 5 kHz.

- **ekvivalentní hladiny hluku pro frekvenční pásmo 0 – 5000 Hz**

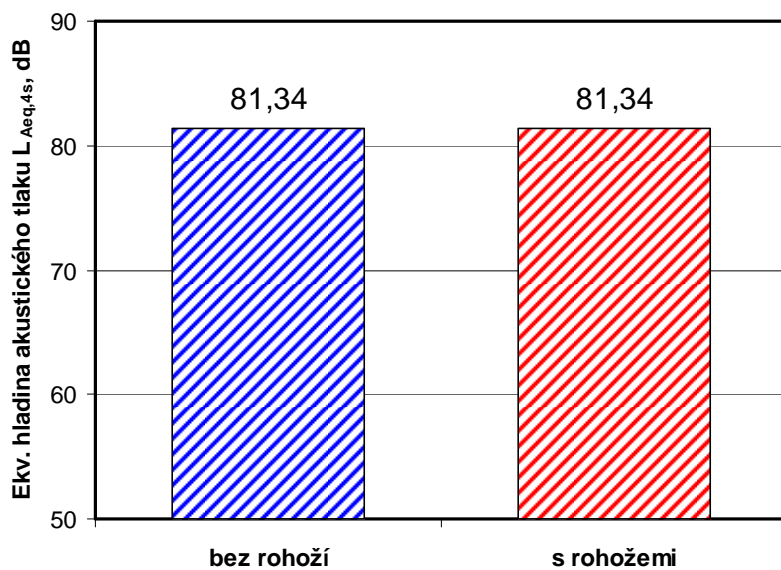
Naměřené výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ pro původní stav tramvajového svršku a pro nový stav se zádlážbovými panely s pryžovou vrstvou jsou níže uvedeny na následujících grafech (viz Obr. 38 – 41).



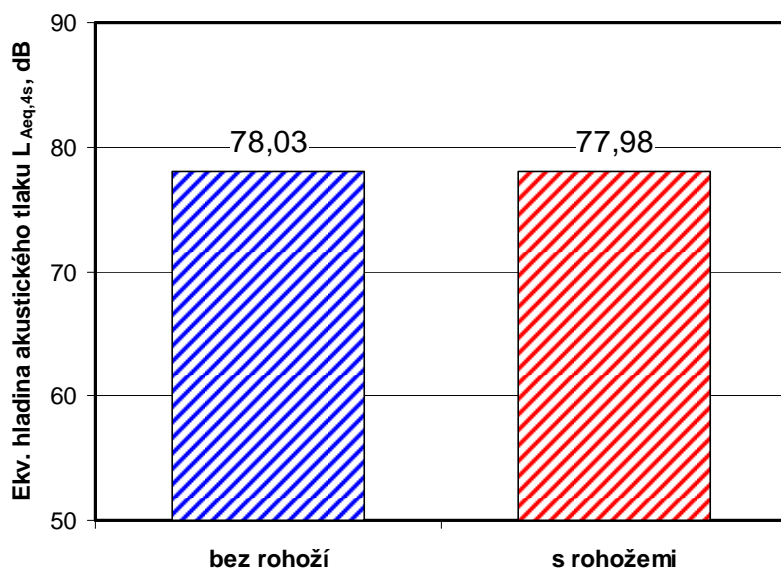
Obr. 38. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy poježděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



Obr. 39. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy poježděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



Obr. 40. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojížděné tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]



Obr. 41. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojížděné tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]

„Při porovnání naměřených hodnot ekvivalentních hladin akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$ je vidět pouze nepatrný vliv nových upravených panelů na hladiny hluku. i když při samotném měření byl znatelný pokles hluku při průjezdu referenční tramvaje upraveným zkušebním úsekem.“[9] Tento jev je způsobený změnou spekter hladin hluku po změně absorpčních vlastností povrchu zádlazbového panelu (Obr. 42 - 45).

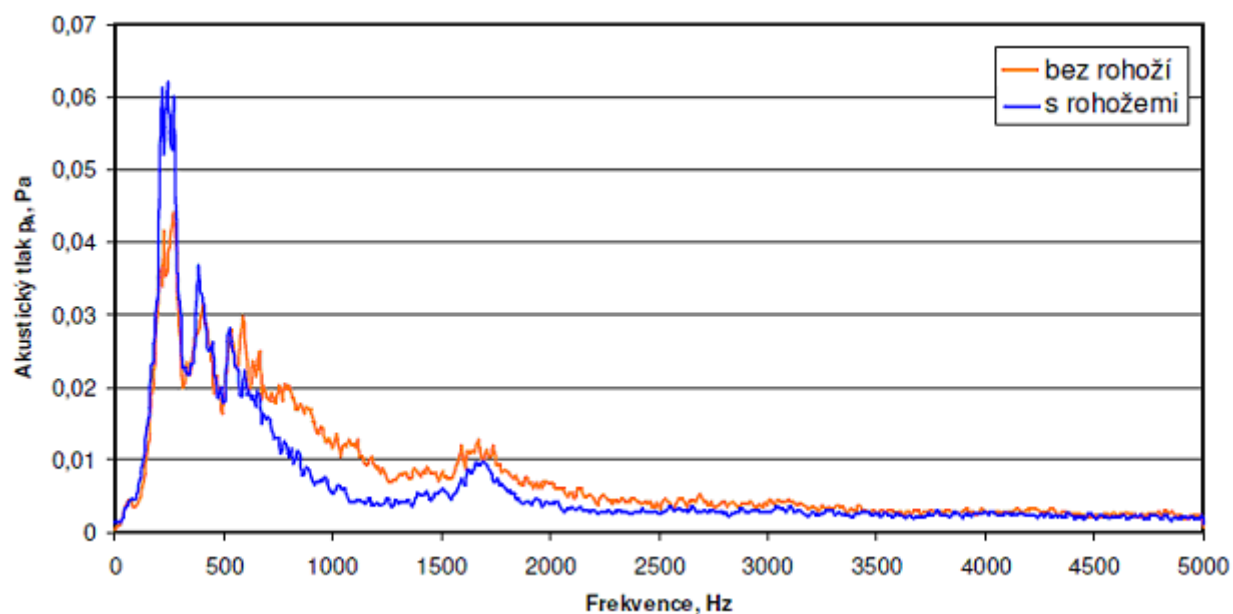
Rychlost průjezdu referenční tramvaje [km/hod]	Původní stav tramvajového svršku		Stav po výměně upravených panelů s pryžovou vrstvou	
	$L_{Aeq,4s}$ [dB]		$L_{Aeq,4s}$ [dB]	
	7,5 m od osy	15 m od osy	7,5 m od osy	15 m od osy
40	79,21	76,29	79,54	76,20
50	81,34	78,03	81,34	77,98

Tab. 6. Referenční výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$
[9]

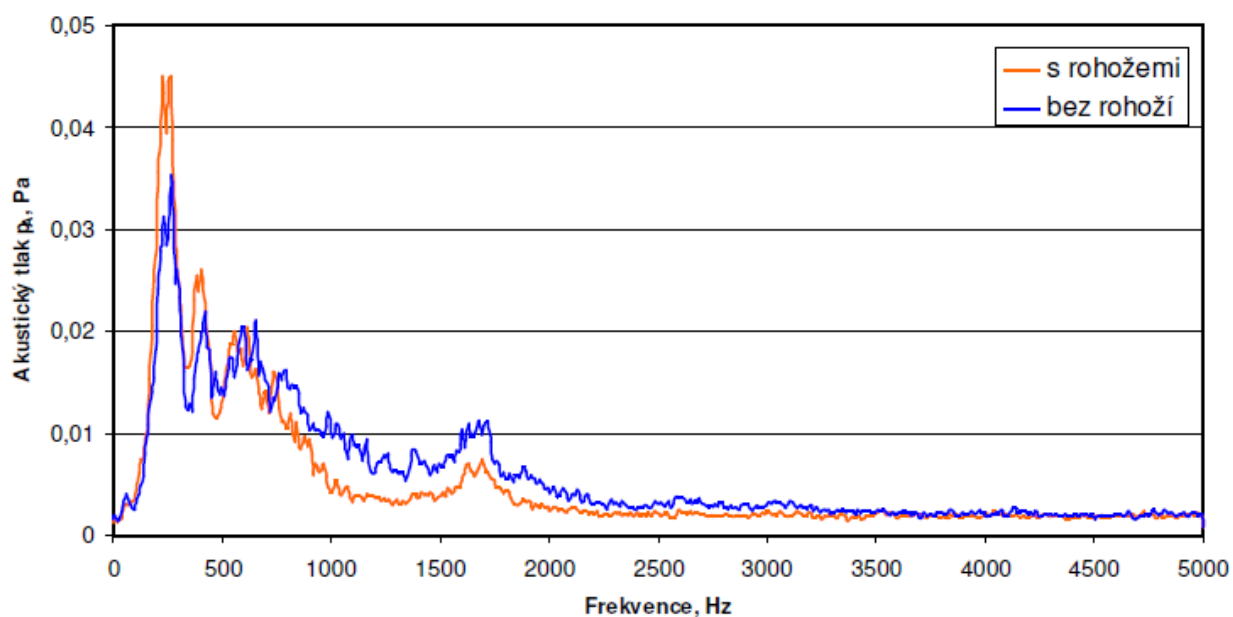
Je zřejmé, že změna povrchové vrstvy panelu a tím i změna pohltivosti jeho povrchu se na ekvivalentní hladině akustického tlaku výrazně neprojeví. Jak je vidět při průjezdu referenční tramvají při rychlosti 40 km.h⁻¹ a vzdálenosti 7,5 m od zdroje hluku hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku dokonce mírně naroste. Abychom zjistili proč tomu tak je, je nutné se zaměřit na spektrální analýzu hladin akustického tlaku.

- **spektrální analýza hladin akustického tlaku pro frekvenční pásmo 0-5 kHz**

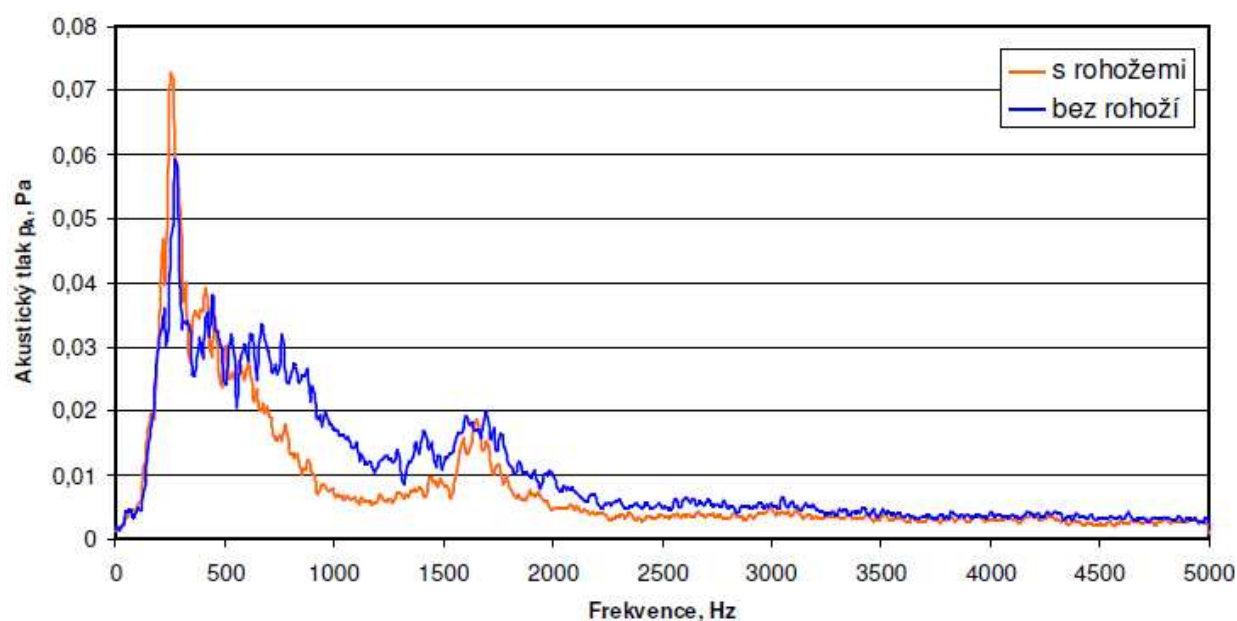
Vzhledem k nejednoznačným výsledkům měření ekvivalentní hladiny hluku byla provedena průměrná spektrální analýza akustického tlaku pro jednotlivá měření. Spektrální analýza byla nejdříve provedena pro akustický tlak p_A [Pa] ve frekvenčním rozsahu 0 až 5 kHz. Ve frekvenční oblasti nad touto oblastí (5 až 20 kHz) nebyly zaznamenány žádné významné hodnoty hluku.



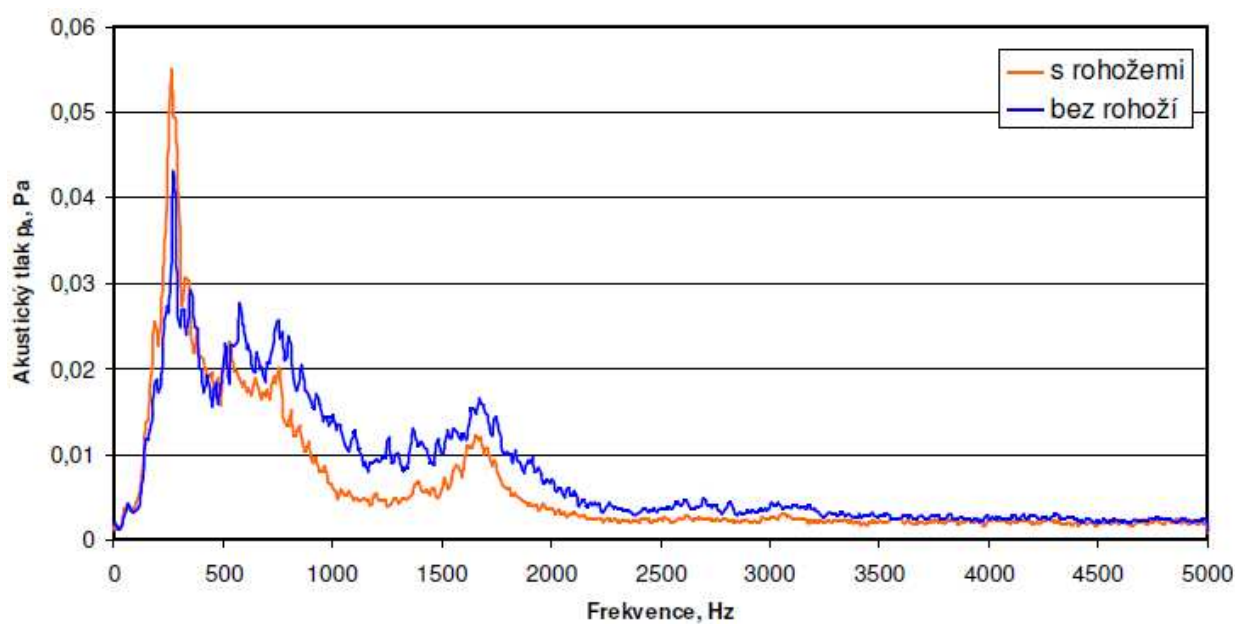
Obr. 42. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



Obr. 43. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



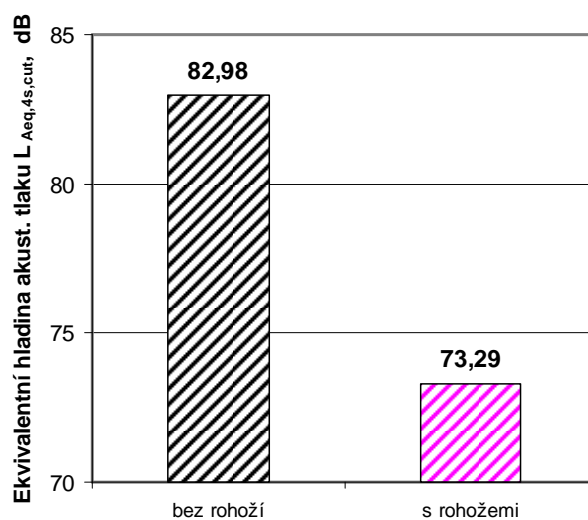
Obr. 44. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]



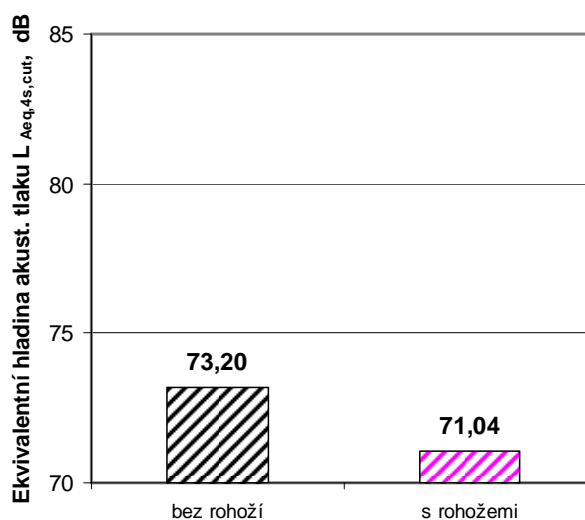
Obr. 45. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]

- **ekvivalentní hladiny hluku a spektrální analýza hladin akustického tlaku pro frekvenční pásmo 500 – 5000 Hz**

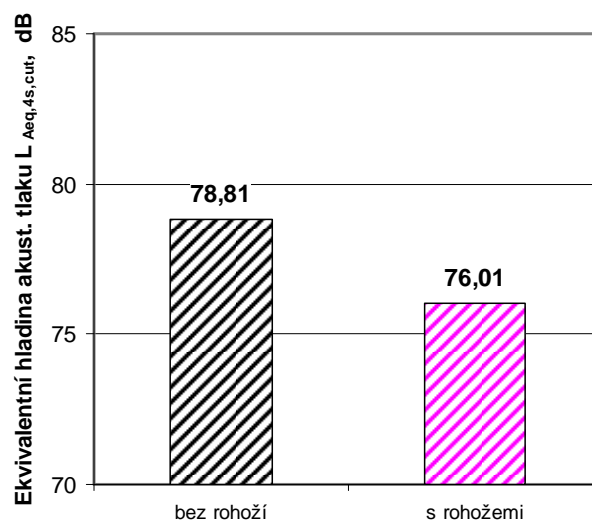
Protože se nejvýraznější změny v průběhu akustického tlaku pro původní stav a stav po výměně panelů projevily ve frekvenčních pásmech od cca 500 Hz nahoru, byla pro srovnání provedena spektrální analýza i pro akustický tlak p_A [Pa] ve frekvenčním rozsahu 500 Hz až 5 kHz. Ekvivalentní hladiny hluku pro pásmo 0,5 – 5 kHz jsou uvedeny na obr. 46 – 49.



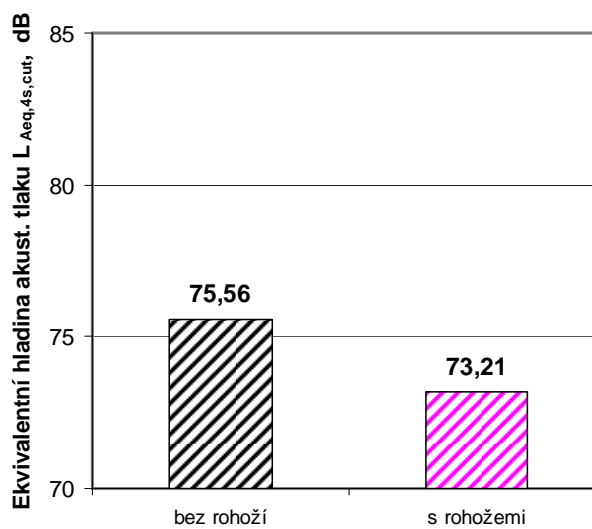
Obr. 46. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojížděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



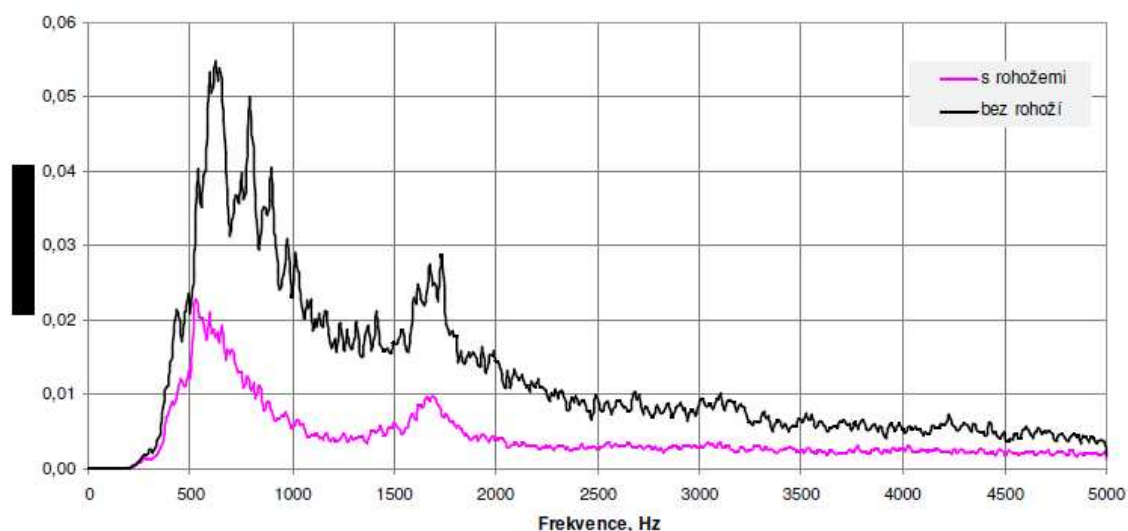
Obr. 47. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojížděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]



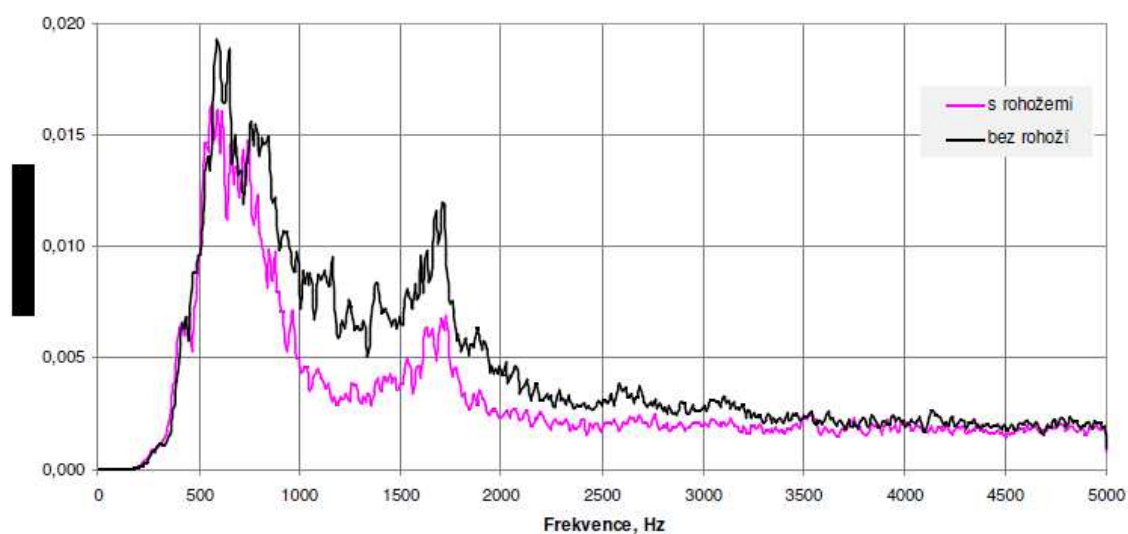
Obr. 48. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojížděné tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]



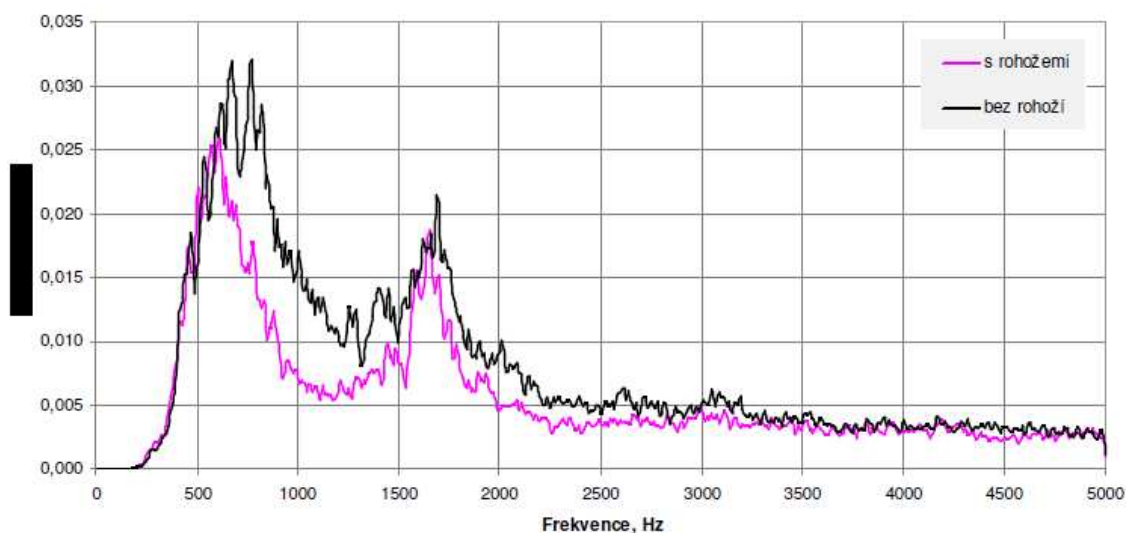
Obr. 49. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojížděné tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]



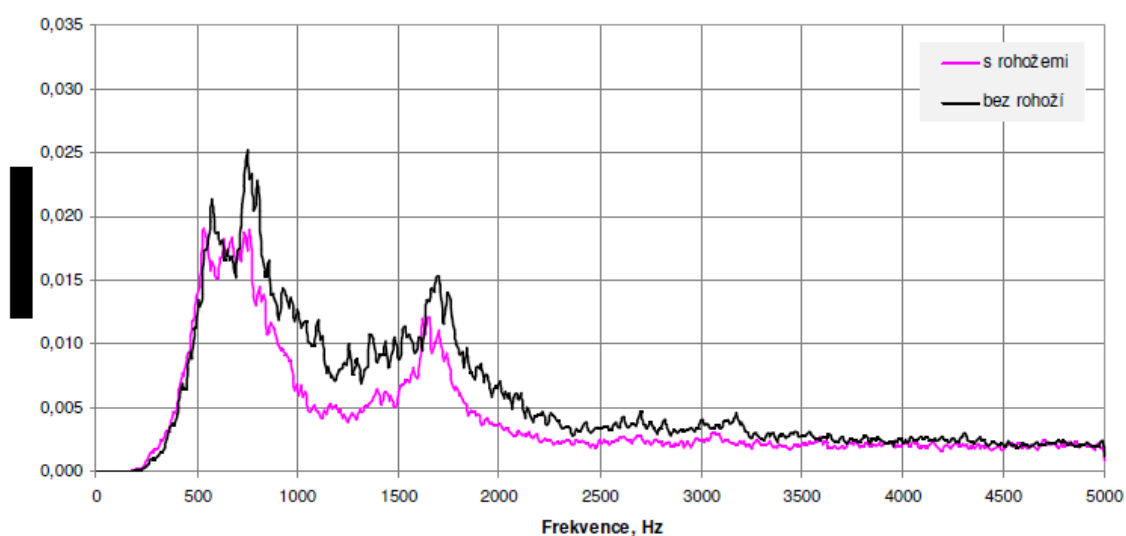
Obr. 50. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h^{-1} ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]



Obr. 51. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h^{-1} ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]



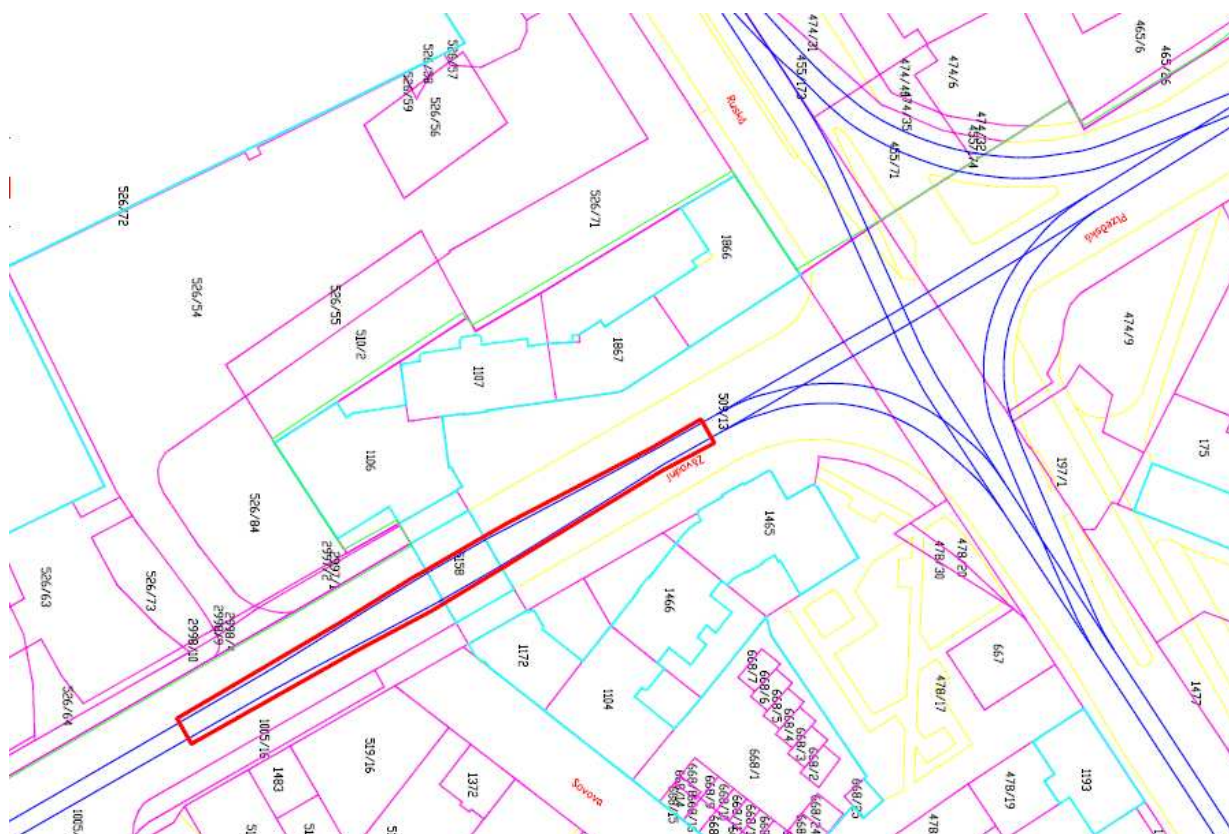
Obr. 52. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h^{-1} ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]



Obr. 53. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h^{-1} ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]

4.6 Ostrava – Vítkovice 2009, Aplikace prvků snižujících vibrace

Na základě požadavku objednatele DPO a.s., proběhlo 24. září 2009 měření hluku a vibrací na ulici Závodní v Ostravě - Vítkovicích. Měření bylo provedeno pro původní stav tramvajové tratě pouze s výměnou již značně provozně opotřebovaných kolejnic za kolejnice nové a pro 4 různé zkušební úseky, na kterých byly použity různé materiály mající za úkol snížit šíření vibrací.



Obr. 54. Situace daného úseku

Pro všechny 4 zkušební úseky byl vybrán úsek tratě o délce 38m v obou kolejích nacházejících se bezprostředně za podjezdem pod bytovým domem (viz Obr. 61). DPO a.s. bylo doporučeno dodržet minimální délku zkušebního úseku jedné technologie v délce 30 m (lépe více). A to z důvodu technologického postupu měření a následné vypovídací hodnotě výsledků tohoto měření. Bylo totiž nutné, aby se referenční tramvaj pohybovala jen na konkrétním měřeném úseku po celou dobu měření. DPO a.s. schválil délku jednoho zkušebního úseku 19 m, což bylo po konzultaci s Katedrou mechanismů a částí strojů Fakulty strojní VŠB - TUO, která prováděla měření, schváleno jako dostačující.

V každém zkušebním úseku došlo k instalaci jedné technologie zabraňující přenosu vibrací na kontaktu zádlážbového panelu a kolejnice. Výchozím předpokladem pro návrh těchto technologií bylo, že dominantní frekvenci 200 – 300 Hz by mohl emitovat právě zádlážbový panel. Účelem těchto opatření bylo snížit nebo zamezit šíření vibrací z kolejnice právě do zádlážbového panelu. Odhad, že jde o panel, nebyl učiněn náhodně, ale na základě velikosti špičkové frekvence a toho, že u podobných měření v oblasti vlakové dopravy se frekvence těžkých betonových prvků (např. pražců) pohybují ve frekvencích do 400 Hz. Tyto úseky byly označeny čísly 1 až 4 a referenční úsek je nadále označován jako „R“ (viz Obr. 61 – úsek „R“ se nachází vpravo, vedle úseku č. 2). Technologie použité na jednotlivých úsecích byly tyto:

- **Úsek 1:** antivibrační rohož CONIRAP tl.24mm, zálivka lehkým betonem + zálivka tmelem Masterflow® 155RG, materiál na bázi zálivkové pryskyřice firmy BASF.
- **Úsek 2:** nástřik kolejnic a upevnění polyuretanem Conipur® M800 (dříve označován jako Conipur 255) což je bezrozpuštědlová, dvousložková hydroizolační membrána firmy BASF.
- **Úsek 3:** antivibrační rohož CONIRAP tl.24mm
- **Úsek 4:** zřízení bez nadstandardních prvků
- **Úsek R:** došlo pouze k výměně kolejnic opotřeбенých provozem, ostatní prvky zachovány



Obr. 55. Vzorek tmelu Masterflow® 155RG použitého na úseku č. 1



Obr. 56. Nástřik hmotou Conipur® M800 na úseku č. 2



Obr. 57. Položené rohože CONIRAP použité na úseku č. 3



Obr. 58. Konstrukce bez nadstandardních prvků použitá na úseku č. 4

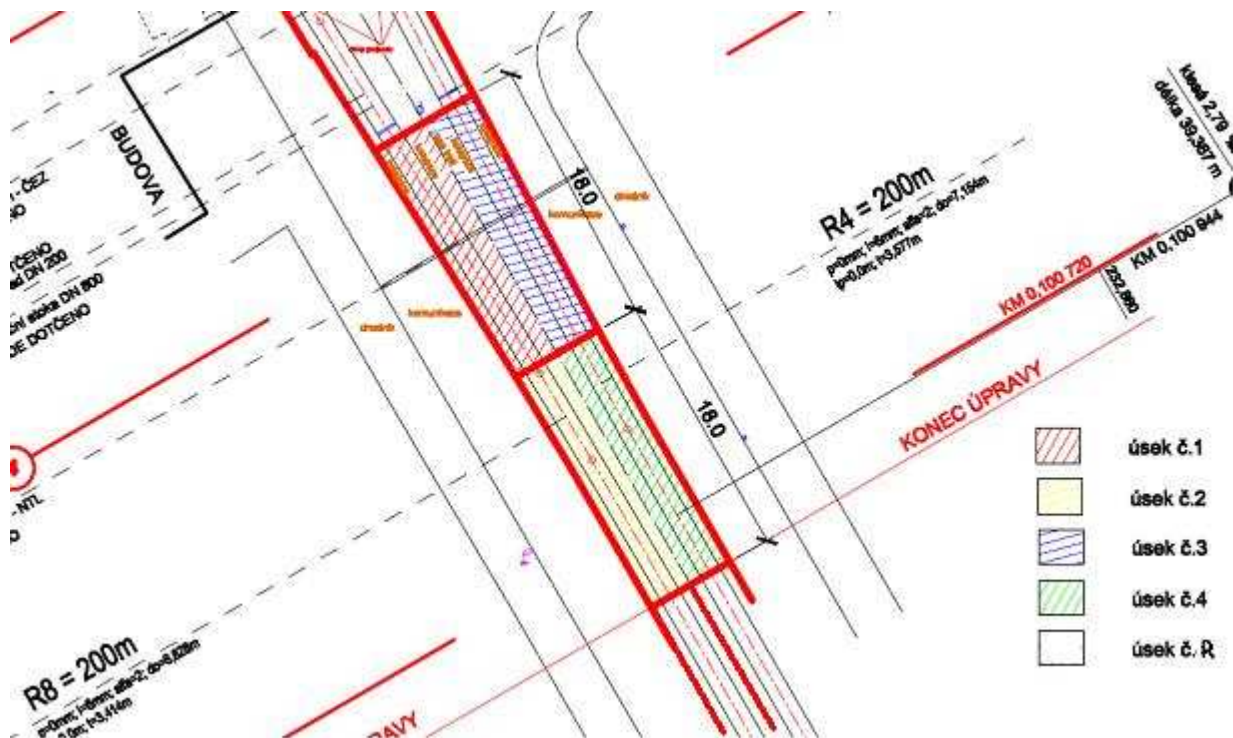
Vzhledem k původnímu stavu kolejnic a pevných styků zádražbových panelů s kolejnicemi bylo očekáváno zlepšení minimálně na jednom ze zkoušených úseků. Současným technologickým postupem je výroba pevného spojení mezi panelem a kolejnicí uložení panelu do betonové směsi. Toto spojení se rozhodně z hlediska přenosu vibrací nedá označit jako vhodné (Obr. 59).



Obr. 59. Zbytky betonu spojujícího zádražbový panel s kolejnicí



Obr. 60. Provozní opotřebení původní kolejnice na ulici Závodní



Obr. 61. Situace zkušebních úseků na ulici Závodní.

Opatření byla instalována současně s instalací pryžové vany pod bytovým domem (Obr 62). Vana byla tvořena propustnou rohoží z recyklované, drcené a následně lisované pryže. Sloužící k zamezení nebo omezení přenosu vibrací z konstrukce svršku dále do podloží a případně do dalších blízkých konstrukcí, domu apod. Konkrétně se jednalo o antivibrační rohož CONIRAP tl. 24 mm firmy Intertech Plus, spol.s.r.o. Plánované opatření si slibovalo snížení šíření vibrací z tramvajového provozu do konstrukce domu, pod kterým trať vede. Samotná instalace pryžové podložky byla spojena s rekonstrukcí křižovatky ulice Závodní a Ruská. Výsledky měření účinnosti instalace pryžové vany pod bytový dům prováděla soukromá firma a v době z pracování této práce nebyly známy. Z toho důvodu se tomuto opatření tato práce dále nevěnuje.



Obr. 62. Průjezd pod bytovým domem na ulici Závodní

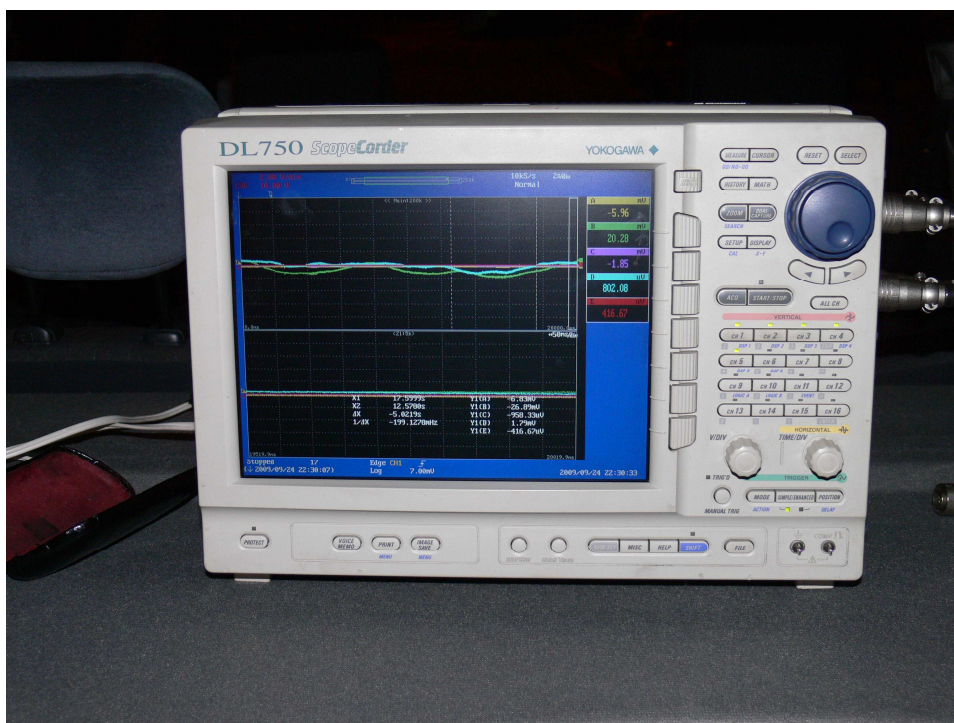
4.6.1 Měřicí zařízení a metodika měření

Měření probíhalo vždy v nočních hodinách, od 23:00. Provoz na okolních komunikacích byl velmi malý. Měřeny byly jen ty průjezdy referenční tramvaje, které nebyly rušeny jinou dopravou. DPO a.s. dodal pro měření 2 tramvaje typu T3. Jednu s obroušenými koly a druhou s tzv. „plochým kolem“. Tramvaje se na z důvodu rozjezdu z prostoru pod bytovým domem, kde je snížený průjezdný průřez, pohybovaly nižší rychlostí než při starších měřeních. Konkrétně 30 km/h. Při druhém měření s tramvají s „plochým kolem“ však došlo k nedodržení podmínek měření a tato se pohybovala rychlostí nižší (cca 26 km/h) než tramvaj s koly novými. Ve skutečnosti rychlost při jednotlivých měřeních oscilovala mezi hodnotami 25,4 – 34 km/h. Toto se samozřejmě projevilo na výsledcích měření a na jejich vypovídající hodnotě (viz 4.6.2).

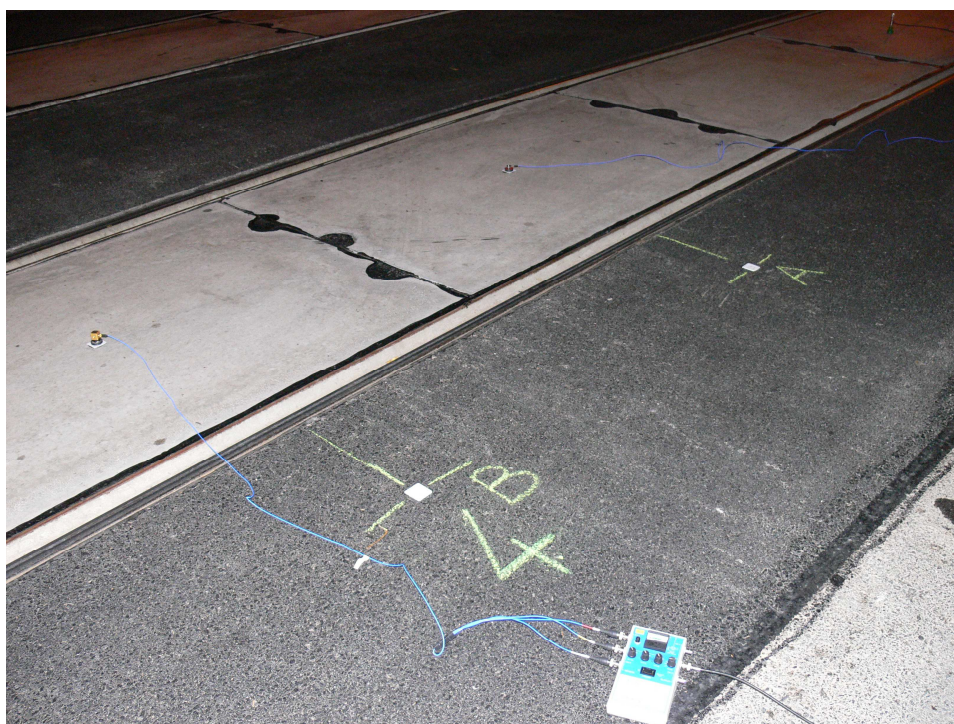
K měření hluku byl použit zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer (Obr. 63), kterým byly snímány a zaznamenávány okamžité hodnoty akustického tlaku p_A [Pa] s váhovým filtrem A po dobu průjezdu referenční tramvaje měřeným úsekem. Zvukoměr byl během měření umístěn na stativ v horizontální poloze ve výšce 1,1 m nad vozovkou a okolním terénem tak, aby se mezi ním a referenční tramvají nenacházela žádná překážka. Měření hluku tedy probíhalo ve volném hlukovém poli. Na mikrofonu zvukoměru byla nasazena větrná clona z měkčeného PUR.



Obr. 63. Použitý zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer s větrnou clonou



Obr. 64. Měřicí osciloskop ScopeCorder DL 720 firmy Yokogawa Electric Corporation



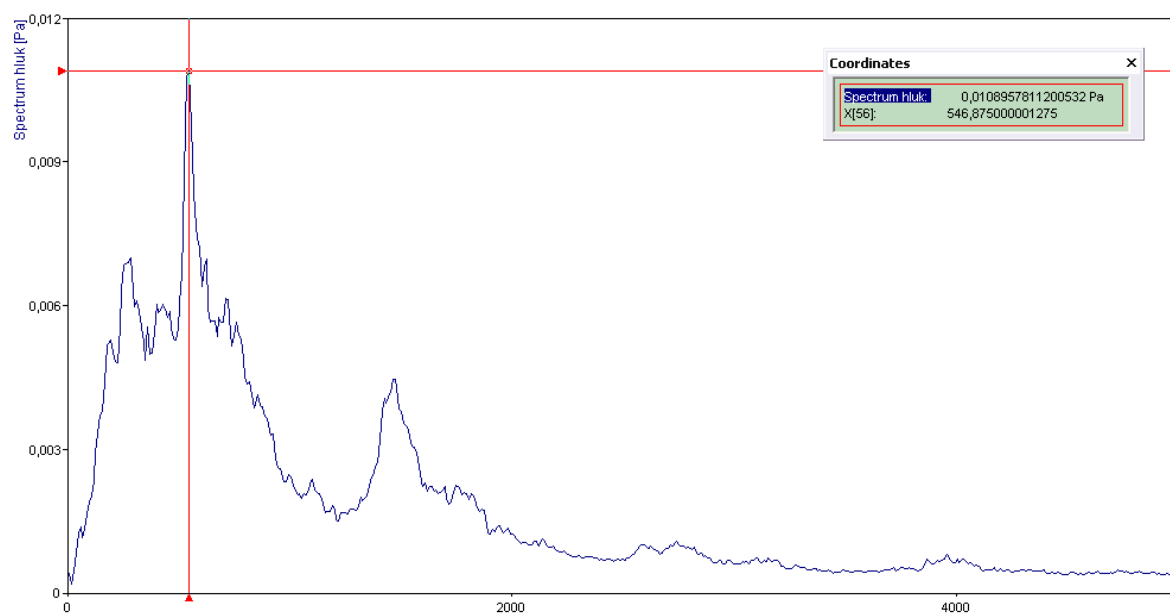
Obr. 65. Snímače měření vibrací a označení zkušebního úseku

4.6.2 Výsledky měření

Výsledky měření z tohoto úseku se v době dokončení této práce ještě stále zpracovávaly. Bylo však možné vyhodnotit dílčí výsledky. V následujících grafech jsou uvedeny výsledky měření hluku na úsecích 1 – 4 a R.



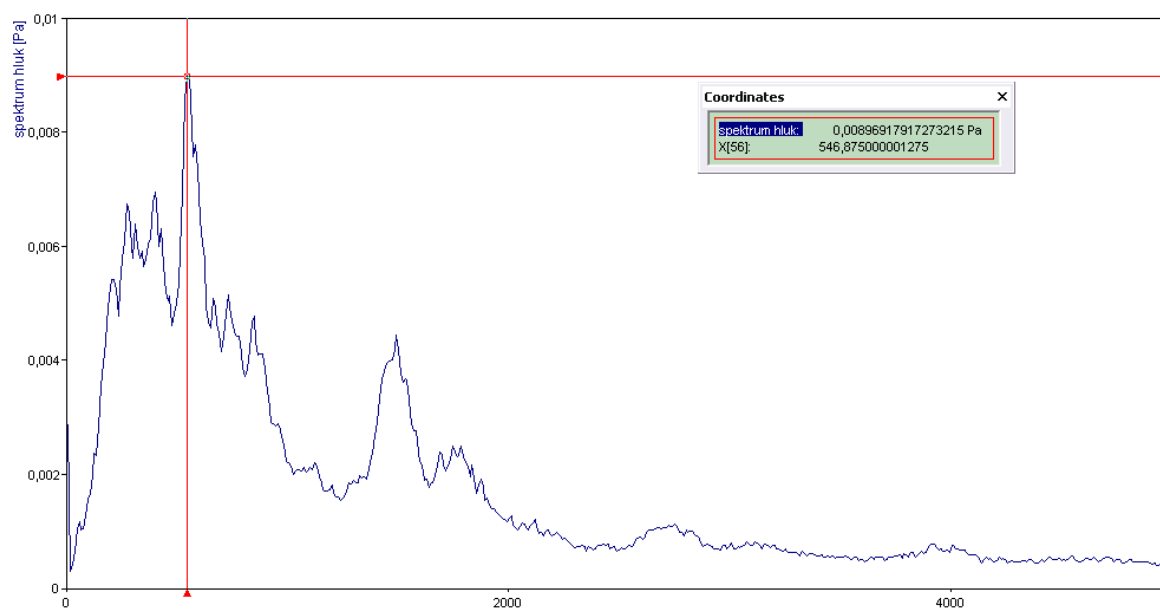
Obr. 66. Spektrum hluku na referenčním úseku při průjezdu referenční tramvaje



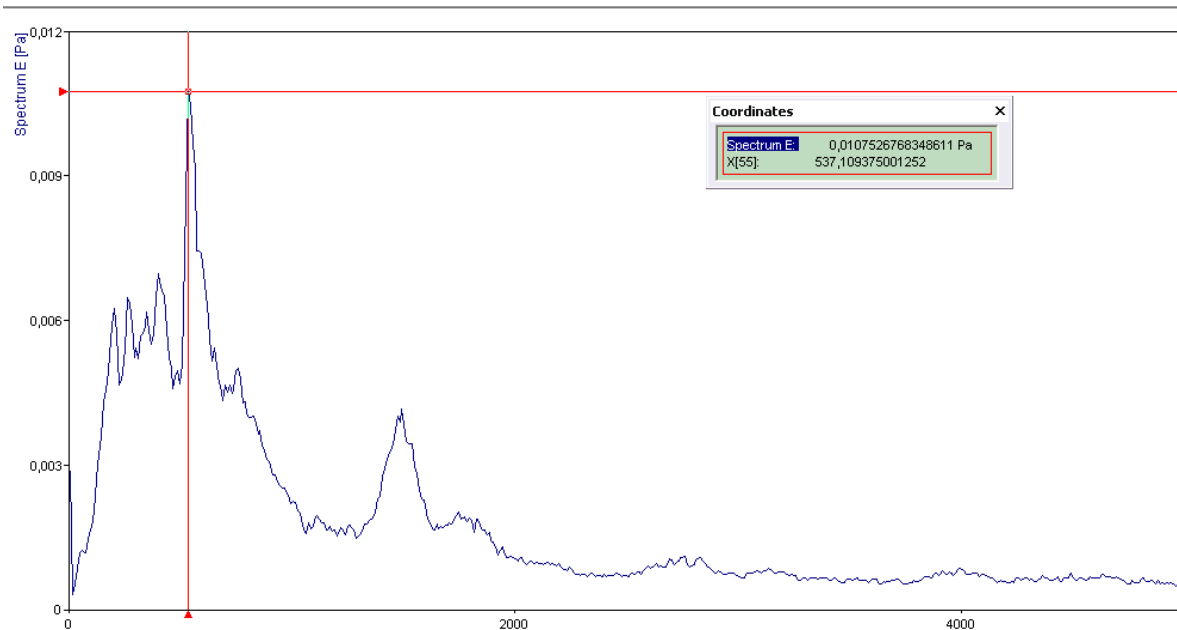
Obr. 67. Spektrum hluku na úseku č. 1 při průjezdu referenční tramvaje



Obr. 68. Spektrum hluku na úseku č. 2 při průjezdu referenční tramvaje

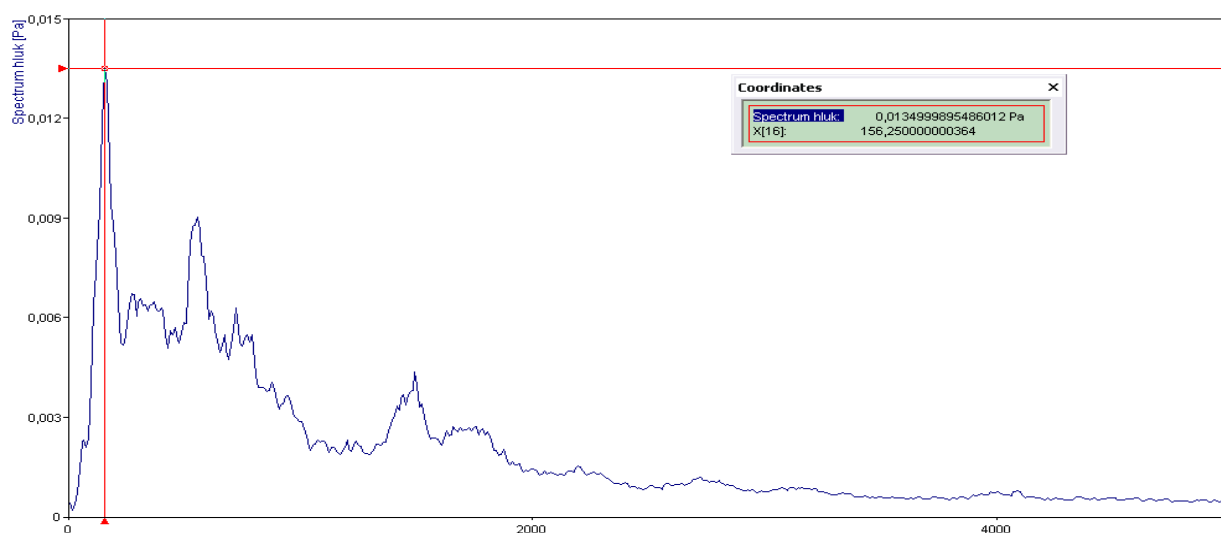


Obr. 69. Spektrum hluku na úseku č. 3 při průjezdu referenční tramvaje

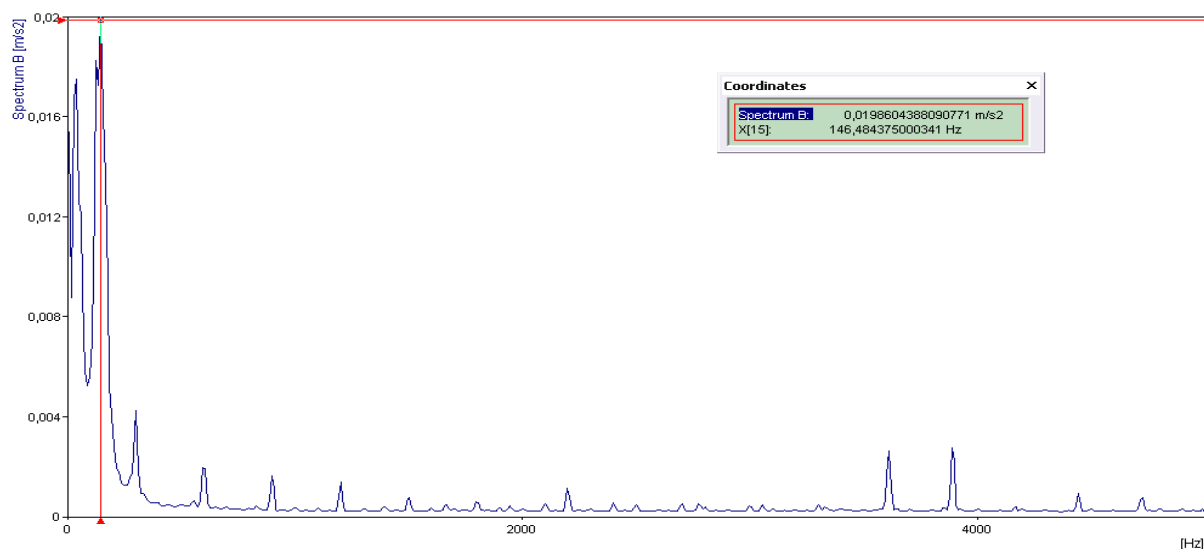


Obr. 70. Spektrum hluku na úseku č. 4 při průjezdu referenční tramvaje

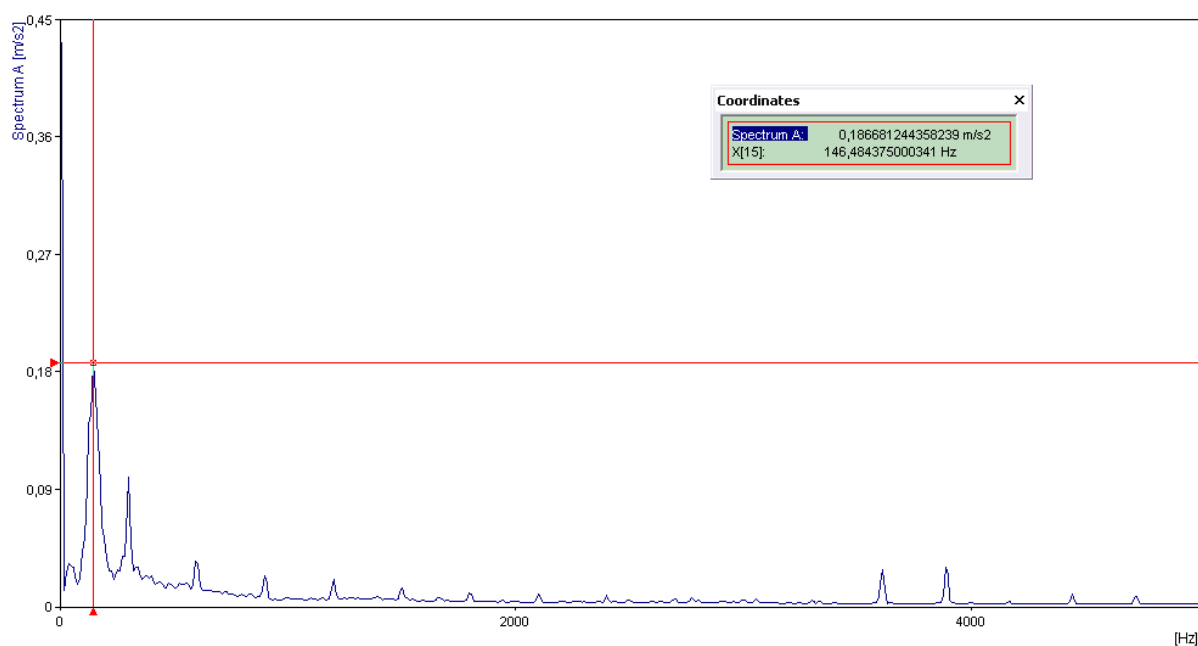
Dále jsou uvedeny výsledky měření hluku, vibrací lože a vibrací vozovky mimo lože pro průjezd tramvaje s plochým kolem referenčním úsekem. Následně je přiložen i graf spektra vibrací panelu z měření frekvence kmitání panelu. Rychlost průjezdu tramvaje s plochým kolem byla okolo 26 km/h, čímž se výrazně lišila od ostatních průjezdů na tomto úseku. Výsledky měření hluku jsou proto neporovnatelné. Více viz 5.2.



Obr. 71. Spektrum hluku na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem



Obr. 72. Vibrace vozovky mimo lože na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem. Vliv plochého kola jasně patrný.



Obr. 73. Vibrace lože na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem. Vliv plochého kola je jasně patrný.

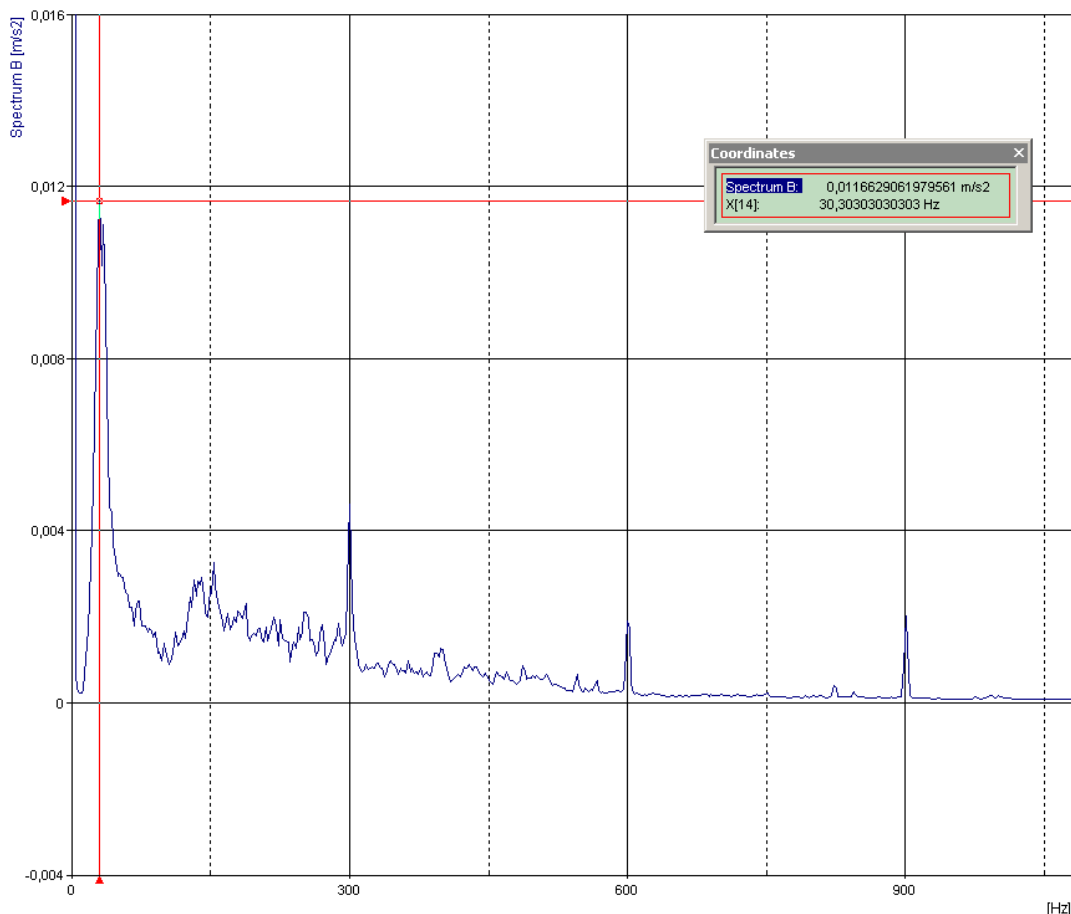
úsek	Vibrace blízko koleje	Vibrace na vozovce
R=100%	0,3169	0,1090
2	115,88	51,46
1	119,01	37,89
3	126,02	61,08
4	154,65	45,26

Tab. 7. Procentuální srovnání šíření vibrací na jednotlivých úsecích při průjezdu referenční tramvaje

úsek	vibrace blízko koleje	vibrace na vozovce
R=100%	0,3169	0,1090
R ploché	582,85	225,78
2=100%	0,3513	0,0540
2 ploché	366,03	398,73

Tab. 8. Procentuální srovnání šíření vibrací na referenčním úseku a úseku č. 2 při průjezdu tramvaje s plochým kolem

Také byla měřena vlastní frekvence kmitání panelu. Předpokladem tohoto měření bylo zjistit příčinu dominantní frekvence okolo 200 Hz. Toto se tímto měřením nepotvrdilo, neboť frekvence kmitání panelu byla naměřena 30,303 Hz.



Obr. 74. Spektrum vibrací panelu

4.7 Ostrava – Mariánské Hory 2009, Měření hluku na koleji s „vlnkovitostí“

Na základě požadavku DPO a.s., bylo v noci z 8. na 9. října 2009 provedeno měření hluku na ulici 28. října (před hotelem Harmony. Viz Obr. 75 – vyznačen červeně). Účelem tohoto měření bylo zjistit přínos broušení kolejnic na útlum hluku z tramvajové dopravy, konkrétně rozdíl v celkové úrovni hluku při průjezdu referenční tramvaje úsekem s vlnkovitými kolejnicemi (Obr. 76) a kolejnicemi neopotřeбенými. Měřena byla rovněž úroveň hluku na pozadí.



Obr. 75. Situace zkušebního úseku na ulici 28. října.



Obr. 76. Vlnkovitá kolejnice ve zkušebním úseku na ul. 28. října

4.7.1 Měřicí zařízení a metodika měření

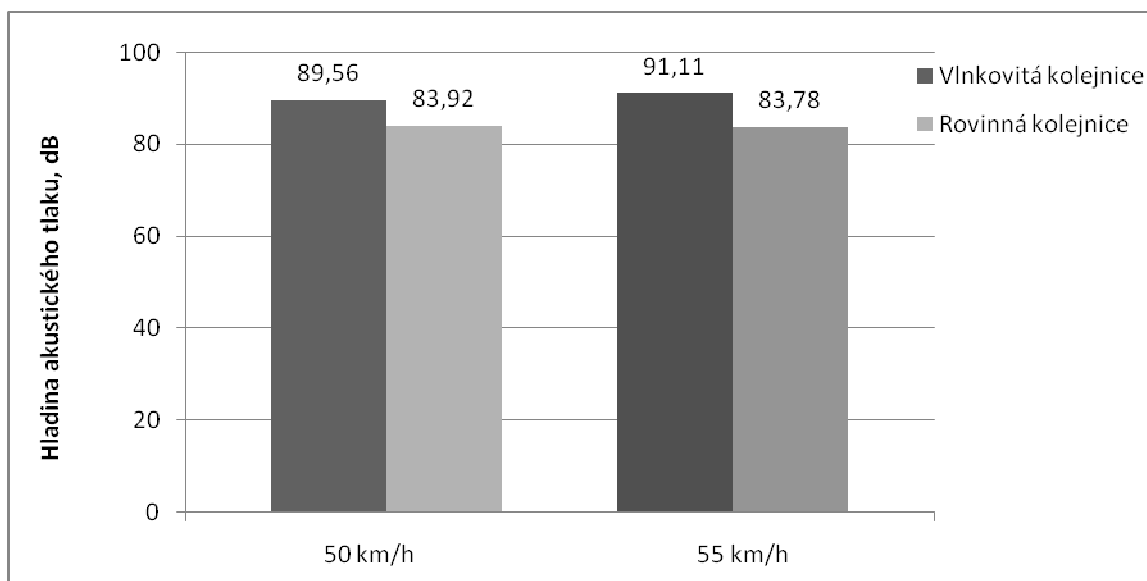
Měření probíhalo vždy v nočních hodinách, od 23:00 hod.. Provoz na okolních komunikacích byl malý. Měřeny byly jen ty průjezdy referenční tramvaje, které nebyly rušeny jinou dopravou. DPO a.s. dodal pro měření tramvaje typu T3. Vůz se na zkušebním úseku pohyboval rychlostí 50 a 55 km/h.

K měření hluku byl použit zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer (Obr. 77), kterým byly snímány a zaznamenávány okamžité hodnoty akustického tlaku p_A [Pa] s váhovým filtrem A po dobu průjezdu referenční tramvaje měřeným úsekem. Zvukoměr byl během měření umístěn na stativ v horizontální poloze ve výšce 1,1 m nad vozovkou a okolním terénem tak, aby se mezi ním a referenční tramvají nenacházela žádná překážka. Měření hluku tedy probíhalo ve volném hlukovém poli. Na mikrofonu zvukoměru byla nasazena větrná clona z měkčeného PUR.

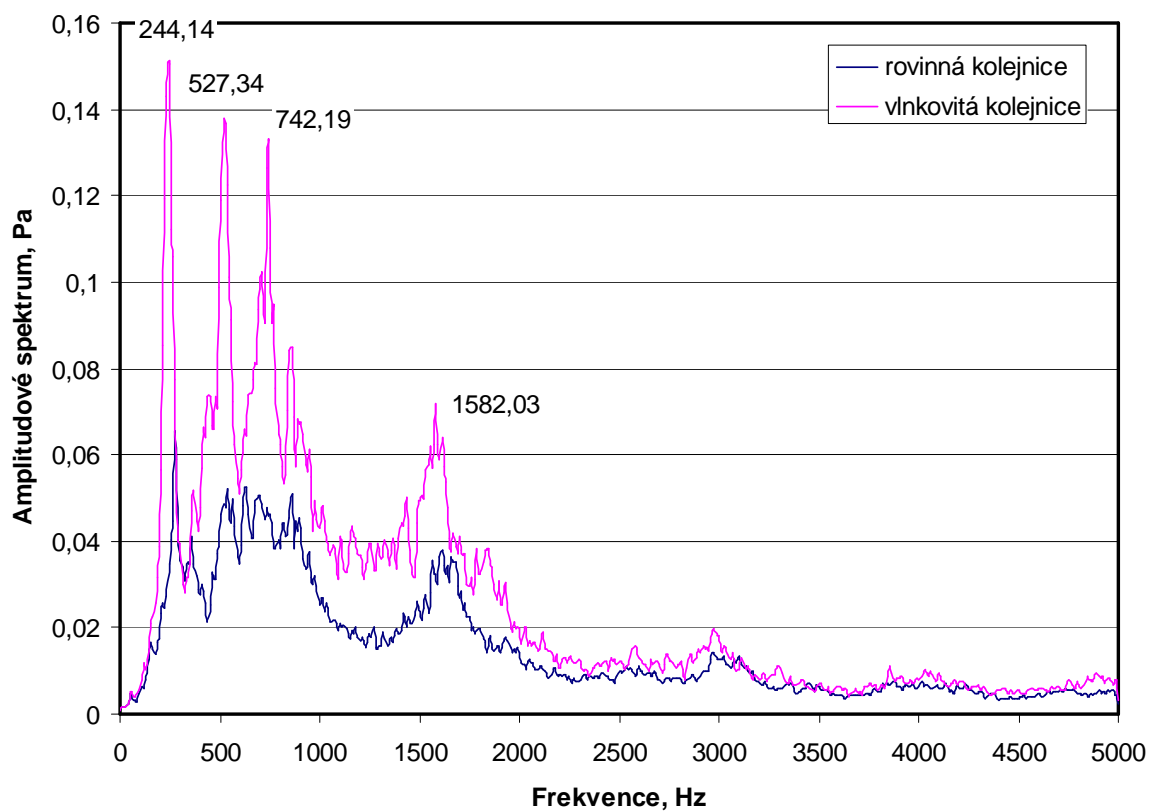


Obr. 77. Použitý zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer s větrnou clonou

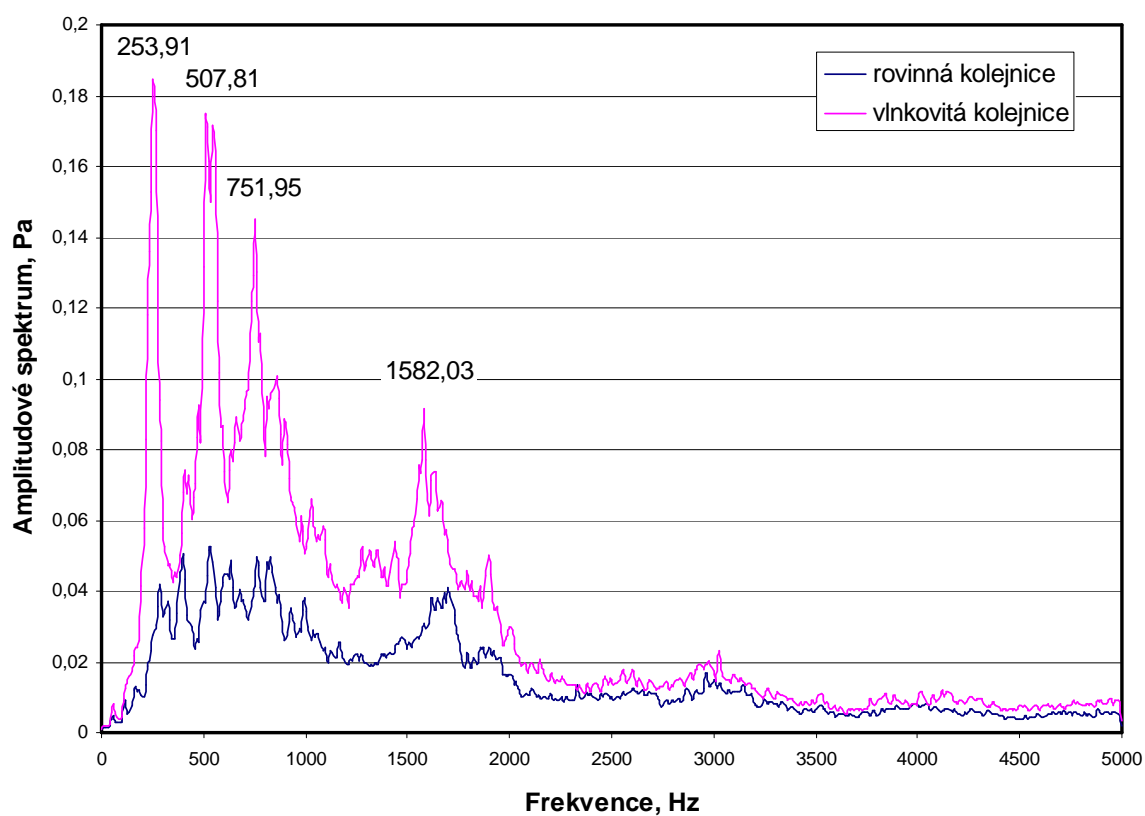
4.7.2 Výsledky měření



Obr. 78. Výsledky měření hluku na úseku s kolejnicemi vlnkovitými a rovinnými



Obr. 79. Frekvenční spektra pro rychlost 50 km/h



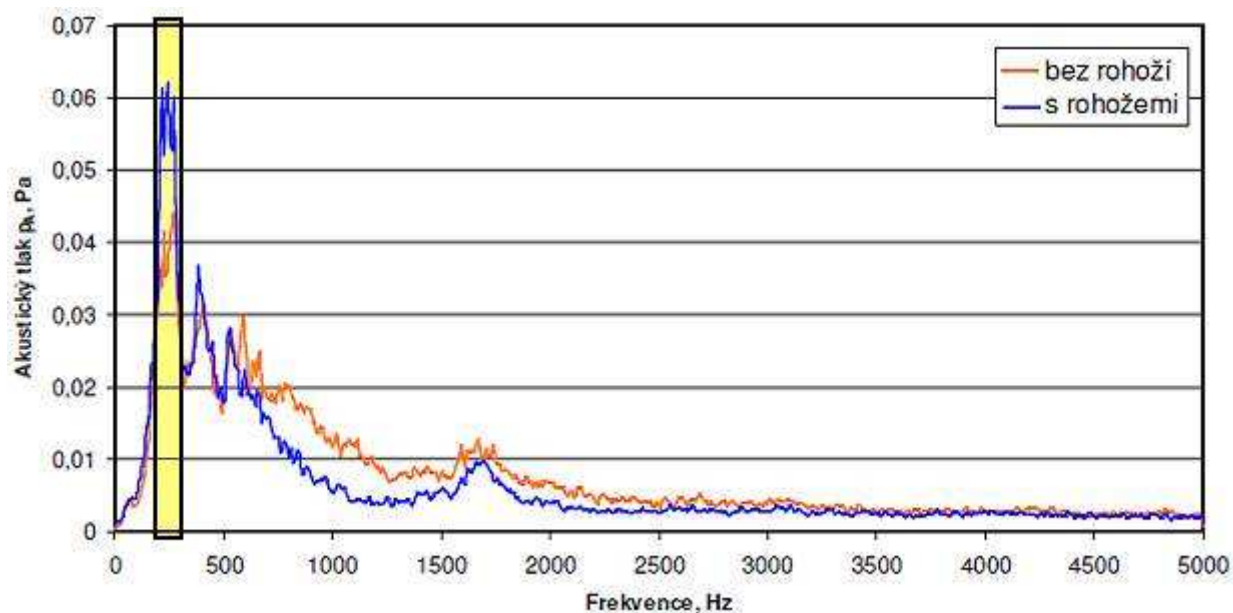
Obr. 80. Frekvenční spektra pro rychlost 55 km/h

5 Analýza a vysvětlení výsledků

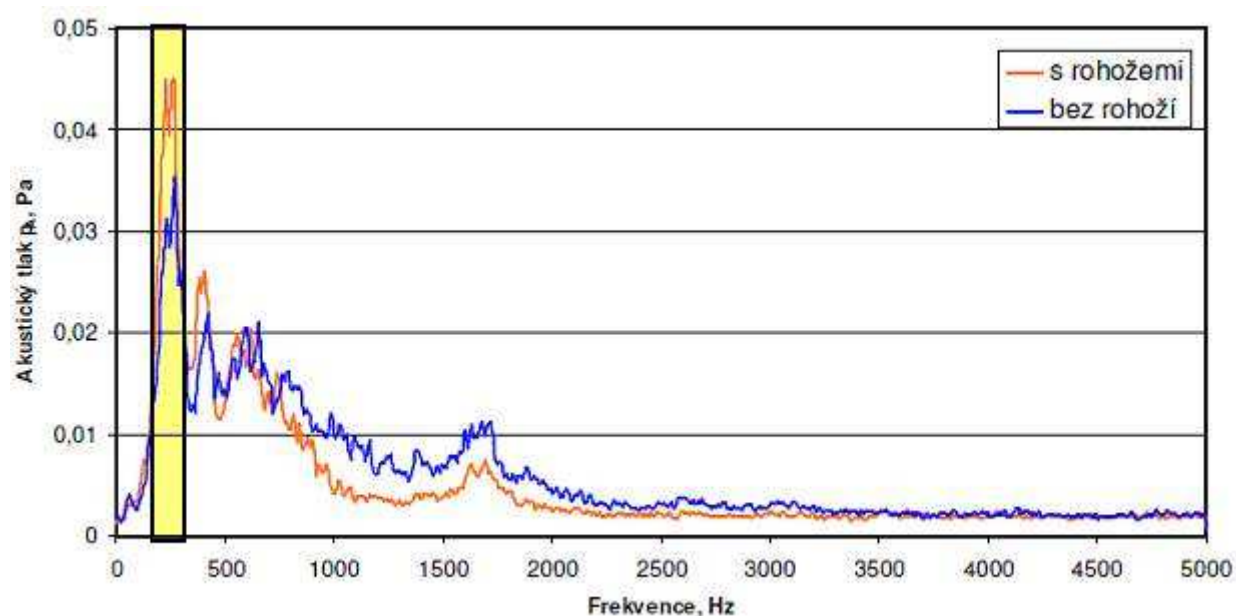
5.1 Ostrava - Hrabůvka 2008, pryžové rohože na zádlažbových panelech

5.1.1 Pokles akustického tlaku ve většině frekvencí a poukázání na „špičku“

Jak je vidět z grafických výstupů spektrální analýzy akustického tlaku (Obr. 81 a Obr. 82) při průjezdu referenční tramvají rychlostí 40 km.h^{-1} , dochází u nové konstrukce s pryžovými rohožemi k nárůstu akustického tlaku v části spektra okolo frekvence 200 Hz. U rychlosti 50 km.h^{-1} jsou výsledky analogické a taktéž dochází k obdobnému nárůstu na okolo výše zmíněné frekvence. Tato špičková frekvence, respektive frekvence v rozsahu přibližně 200 – 300 Hz, se objevovala už i u předcházejících měření zmíněných výše.



Obr. 81. Vyšší hodnota akustického tlaku u panelů s rohožemi u frekvencí okolo 200 Hz při rychlosti 40 km.h^{-1} a vzdálenosti 7,5 m.

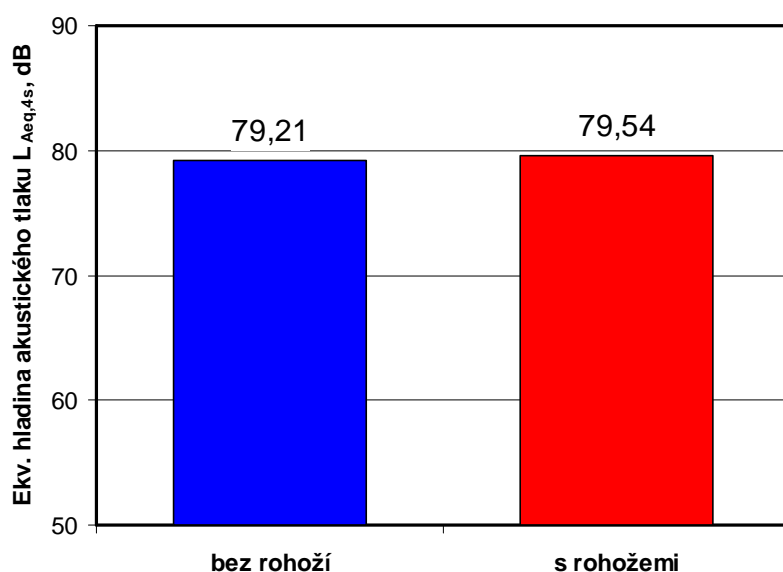


Obr. 82. Vyšší hodnota akustického tlaku u panelů s rohožemi u frekvencí okolo 200 Hz při rychlosti $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a vzdálenosti 15 m.

Při vyhodnocení měření pomocí ekvivalentní hladiny akustického tlaku ve frekvenčním rozsahu 0 – 5 kHz došlo po instalaci panelů s pryžovou vrstvou k nárůstu této hladiny. Jak už bylo zmíněno výše (viz 4.5.2), při samotném měření byl znatelný pokles hluku při průjezdu referenční tramvaje upraveným zkušebním úsekem. Tento rozpor je zapříčiněn rozdílnou vypovídací hodnotou jednotlivých druhů vyhodnocení výsledků měření.

Výsledek hodnocení pomocí ekvivalentních hladin akustického tlaku je používán pro hodnocení prostředí dle míry hlukové expozice. Tímto způsobem se také hluková expozice hodnotí dle Nařízení vlády ČR číslo 148/2006 Sb. [13]. Výsledný údaj je přehledné, číselné hodnocení, ale pro vyhodnocení účinnosti technických opatření v konstrukci tramvajového svršku je nedostačující. Neboť jak z prostého zjištění, že ekvivalentní hladina akustického tlaku se v určitém postavení měřicího zařízení zhoršila o 0,33 dB, odvodíme příčinu?

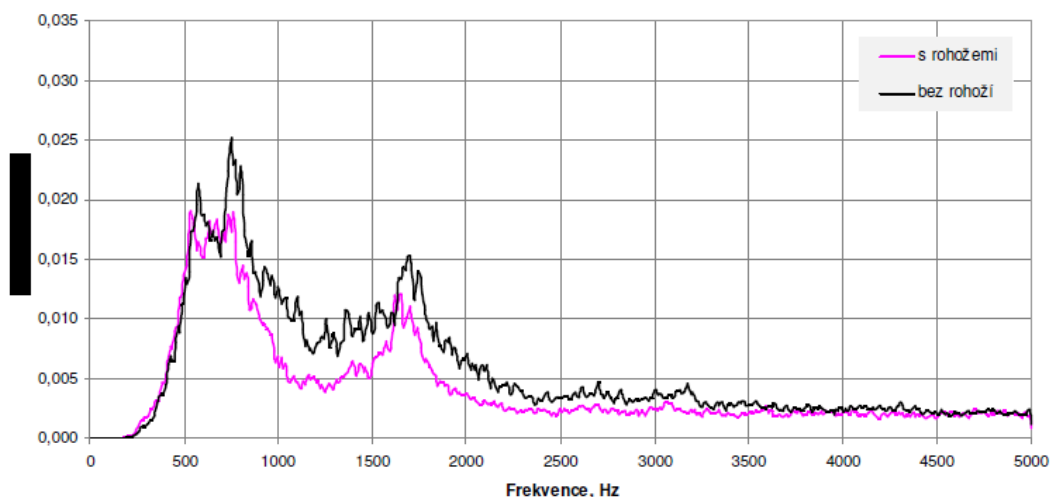
Nyní je jasné zřejmé, že měření pomocí ekvivalentní hladiny hluku nemůže poskytnout celkový obraz pro hodnocení použité konstrukce. Z tohoto důvodu je pro nalezení příčiny zhoršení nutné provést spektrální analýzu záznamu akustického tlaku a nalezení špičkových frekvencí (Obr. 81. a 82.).



Obr. 83. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojížděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]

5.1.2 Přiřazení možných původců ke „špičce“

Z grafu spektrální analýzy pro frekvence 500 – 5000 Hz (Obr. 84) je patrný pokles akustického tlaku v celé části měřeného spektra, a to jak pro všechny rychlosti referenčního vozidla, tak pro všechny vzdálenosti zvukoměru. Proto bylo rozhodnuto dále pokračovat ve směru měření vlastních frekvencí jednotlivých prvků konstrukce svršku, pro přiřazení problematické frekvence k jejímu zdroji a případnému dalšímu odstranění.



Obr. 84. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]

Měření bylo provedeno pro rychlosti 40 a 50 km.h⁻¹, což jsou rychlosti, u kterých se střetávají křivky spekter akustického tlaku způsobeného hlukem z přenosových systémů a hlukem z valivého pohybu kola (Obr. 8). Předpokládalo se, že bude vhodné hledat původce „špičky“ právě zde. Po vyhodnocení měření ze zkušebních úseků na ulici Závodní bylo zjištěno, že nalezení příčiny hledané „špičky“ nebude tak jednoduché, jak se zprvu předpokládalo. Je dokonce možné, že tento nárůst by mohl být způsoben i samotným zkušebním vozidlem, tedy jeho technickým stavem, což bylo DPO a.s. před měření na ulici Závodní označeno jako vysoce nepravděpodobné. Už jen z toho důvodu, že nárůst byl zaznamenán v oblasti frekvence, kde se obvykle nachází lokální maximum hladiny akustického tlaku produkované průjezdem tramvajového vozu. Toto bylo ověřeno na mnoha měřeních. Proto se tato práce dále ubírala cestou hledání zdroje hluku, okolo frekvence 200 Hz, směrem ke konstrukci svršku. A proto se logicky jako první zkoumaly prvky, které se před druhým měřením měnily.

Z výše zmíněného vyplynul předpoklad, že nárůst ve frekvenci okolo 200 Hz může způsobovat přenos hluku přes upevňovací dále na pražec, případně zádlažbový panel a jejich následná rezonance (viz. Obr. 17). Jako vhodné řešení proto byla navržena aplikace elastického materiálu do prostoru mezi pražec a zádlažbový panel. Výsledky měření tohoto navrženého opatření již byly zmíněny výše (viz 4.5.2) a jsou hodnoceny v podkapitole 5.2.

Za jednu z možných příčin bylo zvažováno, že by tato špička mohla být způsobena „lepší“ přenosem hluku díky nově utaženým upevňovacím, které na staré konstrukci byly jistě uvolněny provozem. Proto by bylo vhodné provést na tomto úseku další měření po více než roce provozu a porovnat nové hodnoty s těmi původními. Při opakovaném měření je však třeba trvat na splnění maximálního možného počtu stejných podmínek měření.

5.2 Ostrava – Vítkovice 2009, Aplikace prvků snižujících vibrace

Frekvence 200 - 300 Hz, která se objevila při měření hluku na úseku s panely opatřenými pryžovou rohoží (viz 4.5) a jež měla být potvrzena měřením vibrací panelu na ul. Závodní, se nepotvrdila. Na ulici Závodní panely vibrují s frekvencí okolo 30 Hz, což je vzhledem k jejich uložení v podsypu a vyšší hmotnosti pochopitelné. Frekvence okolo 200 až 250 Hz se sice objevila znovu, ale při měření hluku na ul. Závodní (Obr. 67 a 68).

V současné době není jasné, co tuto frekvenci způsobuje. Jednou z možných příčin se jeví samotná tramvaj, ale v této chvíli toto potvrzeno není. Pro zjištění původce této dominantní frekvence by bylo nutné uskutečnit celou řadu měření za dodržení neměnných podmínek, s postupnou změnou vždy jen jedné z nich a následného sledování změn. Za povšimnutí stojí nižší hluk tramvaje s „plochými koly“ oproti tramvaji s koly v dobrém stavu (Obr. 66 a 71). Tento rozpor oproti všem předpokladům je způsoben tím, že tramvaj s „plochým kolem“ jezdila mnohem pomaleji (cca 26 km/h) než tramvaj s koly dobrými. Výsledné hodnoty hluku jsou proto neporovnatelné a je třeba se řídit jen podle měření vibrací, kde se vliv plochého kola jasně projevil (Obr. 72 a Tab. 10). Pokud by tramvaj s „plochými koly“ jezdila rychlostí metodikou měření požadovanou, byl by vliv plochých kol na intenzitu vibrací ještě více patrný. Výsledky měření při průjezdu referenční tramvají jsou uvedeny v Tab. 9. a zde je také procentuálně vyjádřen pokles či nárůst vibrací na jednotlivých úsecích. Fialovou barvou je vyznačeno procentuální srovnání vibrací blízko koleje, jehož hodnota je důležitá z hlediska životnosti svršku. Zelenou barvou je vyznačeno procentuální srovnání vibrací přilehlé vozovky, jehož hodnota ukazuje, jak se vibrace šíří do okolí.

úsek	Vibrace blízko koleje	Vibrace na vozovce
R=100%	0,3169	0,1090
2	115,88	51,46
1	119,01	37,89
3	126,02	61,08
4	154,65	45,26

Tab. 9. Procentuální srovnání šíření vibrací na jednotlivých úsecích při průjezdu referenční tramvaje

Výsledky měření při průjezdu tramvaje s plochým kolem na úseku č. 2 a na referenčním úseku jsou uvedeny v Tab. 10 a vliv plochého kole je z nich jasně patrný. Pokud by byla dodržena stejná rychlost průjezdu jako u tramvaje s kolem v dobrém stavu, byl by tento rozdíl ještě více patrný.

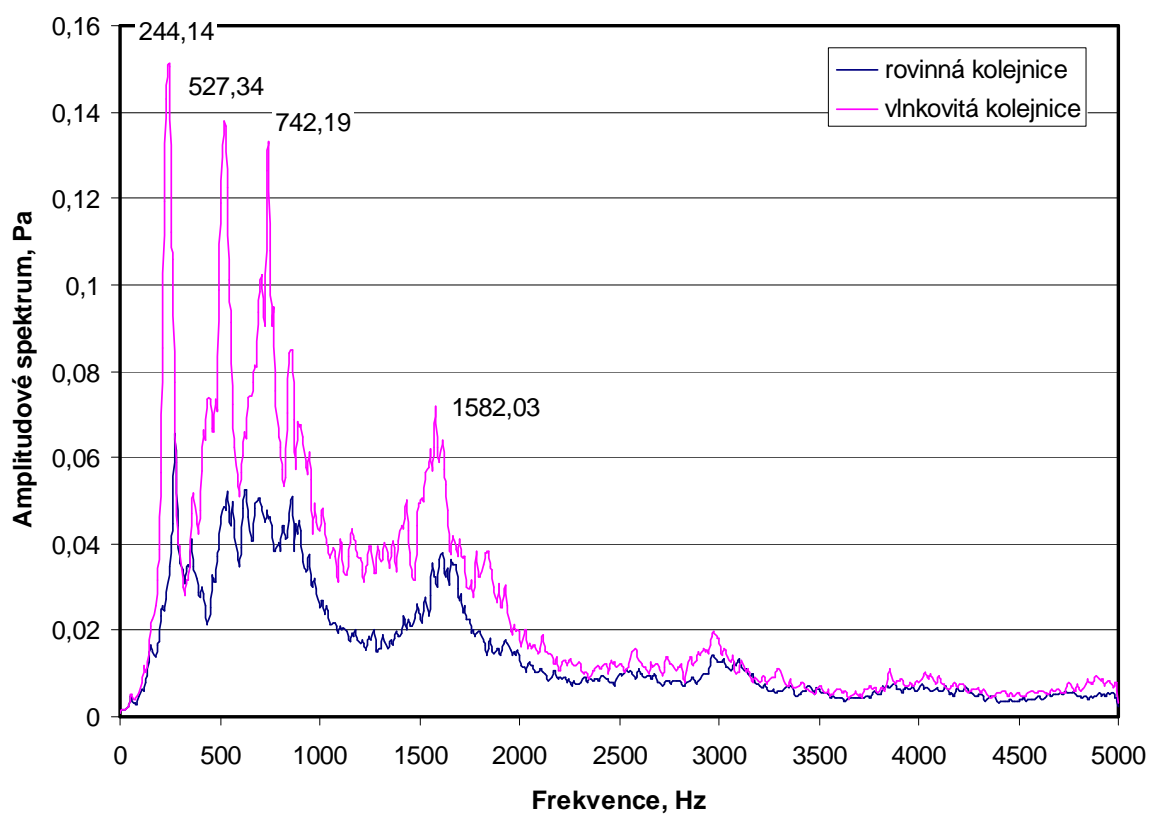
úsek	vibrace blízko koleje	vibrace na vozovce
R=100%	0,3169	0,1090
R ploché	582,85	225,78
2=100%	0,3513	0,0540
2 ploché	366,03	398,73

Tab. 10. Procentuální srovnání šíření vibrací na referenčním úseku a úseku č. 2 při průjezdu tramvaje s plochým kolem

5.3 Ostrava – Mariánské Hory 2009, Měření hluku na koleji s „vlnkovitostí“

Účelem tohoto měření bylo ověřit předpoklad, že pravidelná údržba kolejnic broušením vede ke snížení hlučnosti z provozu tramvajové dopravy. Toto se měřením potvrdilo pro obě měřené rychlosti (Obr. 78). Jak je vidět z frekvenčních spekter (viz Obr. 85) i při tomto měření se opět objevila frekvence okolo 250 Hz. Z tohoto měření vyplývá, že pravidelnou údržbou stavu hlavy kolejnic broušením dochází ke značnému útlumu hluku. Dle tohoto měření se jedná o útlum až o 7,33 dB pro rychlost 55 km/h. Opět si musíme uvědomit, že snížení hluku o 6 dB odpovídá polovině původní hodnoty. Výhodou tohoto opatření je, že se dá aplikovat pro všechny typy tramvajových svršků. Je však nezbytné si uvědomit, že toto opatření je třeba pro

co nejlepší efekt používat v rámci pravidelné údržby jako prevenci proti vzniku vad a opotřebení kolejnic.



Obr. 85. Výsledky měření hluku na úseku s kolejnicemi vlnkovitými a rovinnými

6 Závěr a doporučení

V mé práci jsem shromáždil dosavadní informace a podklady od DPO a.s. a dále je doplnil o výsledky a měření z let 2008/2009, přičemž několika z nich jsem se aktivně účastnil. Při zpracování této práce jsem čerpal z různých zdrojů, jak z naší, tak i zahraniční technické literatury a dalších teoretických podkladů. Na základě starších i posledních měření jsem provedl analýzu opatření použitých, či testovaných u DPO a.s. a doporučil soubor konkrétních opatření, který jsem rozdělil do 3 oblastí.

6.1 Opatření pro omezení hluku původem ze styku kolo – kolejnice

Jak samotný název napovídá, tato opatření se zaměřují na zamezení vzniku hluku na kontaktu kolo – kolejnice. Hlavně na omezení vzniku nerovností na jejich kontaktu. Jde tedy o 2 opatření. Konkrétně o detekci a broušení plochých kol a broušení kolejnic.

Přínos broušení plochých kol nebyl samostatně měřen a vzhledem k nejednoznačnosti měření hluku na ul. Závodní (Viz. 5.2) není možné číselně vyjádřit efekt tohoto opatření. Jeho přínos je však i u tohoto měření patrný, a to zejména na snížení vibrací (Tab. 10). Zde byl na referenčním úseku naměřen nárůst vibrací při průjezdu tramvaje s plochým kolem až na 582,85 % hodnoty zjištěné při průjezdu tramvaje referenční. Vliv broušení plochých kol je tedy zcela jednoznačný. Pro zjištění konkrétní hodnoty přínosu broušení plochých kol na snížení hlučnosti by bylo třeba provést samostatné měření, avšak při samotném měření byl poslechem patrný rozdíl mezi hlučností od průjezdu tramvaje s koly v dobrém stavu a s koly plochými. Toto opatření má rovněž vliv na pomalejší opotřebování tramvajového svršku vlivem menšího množství rázů od jízdy tramvají.

Přínos broušení pojížděných ploch hlavy kolejnic byl zcela jasně prokázán měřením na ul. 28. října (viz 4.7). Použitím tohoto opatření došlo ke snížení hladiny hluku o hodnotu okolo 6 dB, což je hodnota významná a samotným poslechem na místě měření byl rozdíl jasně patrný. Pro maximální efekt je třeba toto opatření aplikovat jako opatření pravidelné. V současné době je v DPO a.s. používáno pouze broušení **opravné** které odstraňuje vlnky a skluzové vlny značných hloubek a přispívá ke snížení úrovně emitovaného hluku [17]. Problémem tohoto opatření je, že je aplikováno pouze nárazově, a to jen do míst kde již vady

dosáhly značné hloubky. Z toho vyplývá, že od doby rozvinutí vady až po její odstranění vykazuje takto poškozený úsek trati značný nárůst hluku. Cena opravného broušení je cca 200 000,- Kč na 1 km trati (údaje dle DPO a.s.), což toto opatření řadí k těm levnějším. Z dlouhodobého hlediska, a to jak ekonomického, tak vlivu na okolí, je vhodné používat broušení **pravidelné**. Tento druh broušení je broušením opravným použitým v určitých intervalech závislých na místních podmínkách dříve, než vady kolejnic dosáhnou velké hloubky. Tím je zabráněno nárůstu hlučnosti tramvajového provozu na takovémto úseku. Výhodou pravidelného broušení je rovněž udržení trvale dobrého stavu tramvajového svršku, což přispívá ke snížení nákladů na údržbu a prodloužení životnosti.

Současná cena za pravidelné broušení není známa, neboť toto opatření se v DPO a.s. nepoužívá, ale už ze samotné technologie plyne, že k tomuto opatření je třeba menšího počtu jízd a tedy i poměrně menších nákladů. Jestliže cena za 1m instalace bokovnic je včetně montáže 5 090,- Kč a cena opravného broušení 200,- Kč (cena pravidelného broušení bude nižší), vychází provádění pravidelného broušení výhodněji. Samozřejmě je třeba poznamenat, že broušení se musí periodicky opakovat, a to vždy podle dopravní zátěže a jiných relevantních podmínek na konkrétních úsecích, čímž roční náklady narůstají. Avšak i bokovnice se musí pravidelně udržovat a při případném poškození měnit. Rovněž je nutné poznamenat, že na rozdíl od bokovnic, je možné pravidelné broušení aplikovat na libovolný typ tramvajového svršku (jak zakrytý, tak klasický) a bez předchozích technických úprav. Broušení je na rozdíl od jiných opatření časově poměrně nenáročné a lze ho aplikovat v nočních hodinách, kdy je provoz na tratích minimální. Tímto porovnáním nebylo zamýšleno argumentovat proti používání bokovnic. Jejich trvalý přínos ke snížení hlučnosti tramvajové dopravy je ověřený jak měřením, tak i provozem a jejich instalace do klasického tramvajového svršku by měla pokračovat všude tam, kde je to možné a vhodné.

Z výše uvedeného vyplývá, že při poměrně nízkých nákladech je možné dosáhnout výrazného snížení hluku na libovolném úseku tramvajové trati. Vzhledem k dalším nepřímým úsporám plynoucím z pomalejšího tempa opotřebovávání konstrukce tramvajového svršku na úsecích s pravidelně broušenými kolejnicemi, toto opatření rozhodně doporučuji. Rovněž doporučuji investici do detektorů plochých kol (nezbytné je jejich dostatečně přísné nastavení) a jejich důsledné používání pro odhalení a identifikaci vozidel s plochými koly a jejich následné bezodkladné odeslání k přebroušení. Také doporučuji trvat na kvalitním proškolení řidičů tramvajových vozů, což při předpokladu jejich disciplinovanosti v provozu může rovněž

vést ke snížení pravděpodobnosti vzniku plochých kol a dalšímu snížení nákladů na obě výše zmíněná technická opatření.

6.2 Další stavební úpravy tramvajového svršku

Mezi další stavební úpravy tramvajového svršku v této práci řadím zejména opatření popsaná v kapitole 4.5 a 4.6 tzn. základňové panely s profilovanou pryžovou vrstvou a aplikace prvků snižujících vibrace. Na vývoji obou těchto opatření se v současné době pracuje, ale již provedená měření naznačují, že obě tato opatření mají potenciál a na jejich vývoji by se mělo dále pracovat. Z výsledků měření vibrací na ul. Závodní (viz Tab. 9 a Tab. 10) vychází, že aplikací pružných prvků došlo ke snížení vibrací vozovky až o 60 % na úseku č. 1 oproti úseku referenčnímu.

I přes nejednoznačnost výsledků měření na ul. Závodní doporučuji aplikaci pružných prvků do konstrukce tramvajového svršku už jen z hlediska snížení šíření vibrací. Je však třeba provést další měření, zejména pro získání porovnatelných hodnot útlumu šíření hluku.

6.3 Opatření pro zkvalitnění měření na zkušebních úsecích

V průběhu zpracování této práce byla provedena prvotní měření na ulici Závodní a ulici 28. října. Po jejich zpracování navrhuji některá metodická opatření ke zlepšení kvality měření a vypovídací hodnoty jejich výsledků. Měření pomocí **referenčního vozidla** za použití snímačů vibrací a akustického tlaku je vhodné pro časově omezená měření, kdy je možné zajistit stabilní podmínky měření. Výsledky těchto měření jsou vhodné zejména pro hodnocení jednotlivých prvků konstrukce, či materiálů v nich použitých. Proto doporučuji tyto opatření:

- **Soubory měření dělat ve vyšším počtu.** Tím dojde ke snížení rozptylu měřených hodnot a zvýšení vypovídací hodnoty výsledků. Protože měření pomocí referenčního vozidla není možné používat dlouhodobě a nároky na organizaci i finance jsou vysoké, je nutné vyrobít co nejvíce záznamů během jednoho měření a tím zajistit co možná nejpodobnější podmínky měření.

- **Měření provádět v jednom časovém úseku.** Toto opatření je nutné k dodržení co nejvíce podobných vnějších podmínek a z toho vyplývajícího nižšího minimálního počtu měření. Jelikož není možné zajistit stejné meteorologické podmínky, je třeba měřit v jeden den.
- **Měření provádět za použití stejného referenčního vozidla.** Pro co nejlepší možnost porovnání měření z různých úseků používat stejné referenční vozidlo. Jeho vlastnosti se sice časem mění (technické vlastnosti se mění, i pokud je vozidlo odstaveno), ale při použití jiného vozidla by rozdíly byly ještě větší.
- **Dodržení metodiky měření.** Rozhodně je třeba se vyvarovat jakýchkoliv odchylek od stanoveného postupu měření, které je možné eliminovat. V našem případě jde zejména o dodržení pokud možno konstantní hodnoty rychlosti průjezdu při všech měřeních.
- **Investice do dostatečného počtu měřících úseků a technologií.** Pro získání skutečně vypovídajících hodnot měření by bylo třeba dělat měření ve velkém počtu a vždy měnit jen jednu podmínku a sledovat jak se výsledky změní.

Z výše uvedených doporučení je patrné, jak náročné je provádění dlouhodobých měření pomocí referenčního vozidla. Proto jsem hledal možnost jak se těmto problémům vyhnout. Jako vhodnou možnost je jeví použít měření pomocí metody tzv. „**průměrného spektra**“ [22]. Tato metoda je vhodná, pokud potřebujeme konstrukci hodnotit z hlediska útlumu hluku v podmínkách běžného provozu. Měření touto metodou bylo vyvinuto na Katedře železničních staveb Stavební fakulty ČVUT v Praze. Samotné měření probíhá za běžného provozu a měří se průjezdy různých typů tramvajových vozů v různém technickém stavu. „Získané hladiny akustického tlaku hluku pro každou frekvenční složku je potom třeba zprůměrovat ze všech naměřených přejezdů tramvajových vlaků a získat tak spektrum průměrných hladin akustického tlaku hluku“ [22]. Výhodnou tohoto postupu je zvýraznění charakteristických složek spektra a eliminace náhodných zvuků, které mohou ovlivnit výsledky při měření pomocí metody referenčního vozidla.

Měření hluku pomocí této metody je nesporně jednodušší jak z hlediska organizačního, tak i finančního. Výše uvedeným srovnáním s metodou referenčního vozidla jsem nezamýšlel jakékoliv zpochybnění její přínosnosti. Pouze jsem poukázal na to, že pokud je třeba vyhodnotit celou konstrukci z hlediska útlumu hluku v podmínkách provozu, je třeba jí doplnit

o měření pomocí metody průměrného spektra. Proto měření pomocí této metody rozhodně doporučuji.

Katedra prostředí staveb a TZB Fakulty stavební VŠB – TUO v současné době vlastní vhodný zvukoměr použitelný pro měření za použití metody průměrného spektra. Je však třeba zakoupit digitální magnetofon pro zaznamenávání průjezdů jednotlivých vozidel a možnosti pozdějšího vyhodnocení. Pro příklad uvádím jako jeden z vhodných typ SONY ICD-MX20. S tímto vybavením a ve spolupráci s katedrou Částí a mechanismů strojů Fakulty Strojní VŠB – TUO by bylo možné v budoucnu začít efektivněji hodnotit přínos nových konstrukcí z hlediska útlumu hluku tramvajové dopravy.

Z problémů při vyhodnocování výsledků měření na ul. Závodní plyne, že pokud firmy chtějí získat pádné a pravdivé argumenty pro zavedení nových technologií, nemohou na měření šetřit. Zvláště pak v takových případech, kdy existuje velké množství možných zdrojů vibrací i hluku.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Hudečkovi Ph.D. z VŠB – TUO, Ing. Hrudíčkové Ph.D. z VŠB – TUO, panu Martinu Chovanci z DPO a.s. a všem mým blízkým i ostatním za trpělivost, kterou semnou během vypracovávání této práce měli a za pomoc, kterou mi poskytli i přesto, že nemuseli.

7 Seznamy

7.1 Seznam použité literatury

- [1] HLAVÁČEK, J: *Protihluková a protivibrační opatření používaná v evropské železniční síti: Vědeckotechnický sborník ČD, číslo 6, VÚŽ, Praha, 1999*
- [2] HLAVÁČEK, J.: *Studie snižování hlučnosti tramvajových tratí: Vědeckotechnický sborník ČD, číslo 6, VÚŽ, Praha, 1998*
- [3] HRUDIČKOVÁ, M: *Technická zpráva k výsledkům funkčních zkoušek betonových pražců SB8 s pružnou ložnou plochou, které byly uskutečněny v 11/2001 ve zkušebním úseku tramvajové tratě Dopravního podniku Ostrava, a.s. – ulice Martinovská, VŠB-TUO, Ostrava, 2002*
- [4] HRUDIČKOVÁ, M: *Zpráva k měření hluku na ulici Nádražní, VŠB-TUO, Ostrava, 2005*
- [5] HRUDIČKOVÁ, M: *Zpráva k měření hluku při průjezdu tramvaje před a po instalaci bokovnic na ulici Opavské, VŠB-TUO, Ostrava, 2004*
- [6] HRUDIČKOVÁ, M: *Zpráva k měření vibrací, posunů a hluku na ulici Horní v Ostravě - Dubině, VŠB-TUO, Ostrava, 2008*
- [7] HRUDIČKOVÁ, M: *Zpráva k měření hluku na ulici Závodní, VŠB-TUO, Ostrava, 2008*
- [8] HUDEČEK, L. - OŽANOVÁ, E. - ŘEZÁČ, M. - SKOTNICOVÁ, I.: *Odhlučnění tramvajové tratě s krytem - II. Etapa, Ostrava, prosinec 2008*
- [9] HUDEČEK, L. - OŽANOVÁ, E. - ŘEZÁČ, M. - SKOTNICOVÁ, I.: *Snižování hluku tramvajových tratí v podmínkách DP Ostrava, Ostrava, 2009*
- [10] KRČMA, T.: *Hluk v drážní dopravě a způsoby jeho snižování, fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Pardubice, [200-]*
- [11] MASÁR, R.: *Železničná doprava a hluk, Nová železniční technika 4/2006, Brno, 2006*
- [12] MOKRÝ, P.: *Moderní trendy v tlumení hluku a vibrací pomocí piezoelektrických materiálů, Silnice železnice 2/2009, Ostrava, 2009*
- [13] *Nariženie vlády č. 148/2006 o ochrane zdravia pred nepříznivými účinky hluku a vibrací, 2006*
- [14] NOVÁKOVÁ, E. – PAVELKA, K: *Hluková zátěž životního prostředí dopravou, fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Pardubice, 2002*

- [15] PLÁŠEK, O. – HRUŽÍKOVÁ, M. – SVOBODA, R.: *Návrh zkušebního úseku s výhybkou na betonových pražcích s pružnou ložnou plochou*, Nová železniční technika 5/2008, Brno, 2008
- [16] RADIMSKÝ, M: *Vliv protihlukových opatření na tramvajovou dopravu*, VUT, Brno
- [17] *Předpis SŽDC S3/1 Předpis pro práce na železničním svršku*, 2009
- [18] SMUTNÝ, J. – PAZDERA, L: *Využití moderních matematických postupů při analýze dynamických účinku od kolejové dopravy*, Brno, 1999
- [19] SMUTNÝ, J. – MECHLER, J. – PAZDERA, L.: *Analýza vlivu vibrací od kolejové dopravy na obytné budovy*, Nová železniční technika 4/2006, Brno, 2006
- [20] SMUTNÝ, J.: *Použití pryžových bokovnic k snížení úrovně valivého hluku a vibrací*, Nová železniční technika 2/1997, Brno, 1997
- [21] SMUTNÝ, J. – PAZDERA, L. – BOHÁČ, T. – ŠEDĚNKA, M.: *Snižování hluku vlakových souprav metra*, Nová železniční technika 6/2006, Brno, 2006
- [22] ŠPAČKOVÁ, H.: *Protihluková a protivibrační opatření používaná v evropské železniční síti* (habilitační práce), Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2003
- [23] VENGHAUS, H: *Vibration absorbers fitted to rails to reduce the noise of paging trains* *European Rail Technology Review*, Volume 6, Hannover, September 2009

7.2 Seznam tabulek

Tab. 1	Maximální a ekvivalentní hladiny akust. tlaku pro průjezd rychlostí 30 km/h
Tab. 2	Maximální a ekvivalentní hladiny akust. tlaku pro průjezd rychlostí 40 km/h
Tab. 3	Výsledky měření vibrací na úseku 1
Tab. 4	Výsledky měření vibrací na úseku 2
Tab. 5	Výsledky měření vibrací na úseku 3
Tab. 6	Referenční výsledné ekvivalentní hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,4s}$
Tab. 7	Procentuální srovnání šíření vibrací na jednotlivých úsecích při průjezdu referenční tramvaje
Tab. 8	Procentuální srovnání šíření vibrací na referenčním úseku a úseku č. 2 při průjezdu tramvaje s plochým kolem
Tab. 9	Procentuální srovnání šíření vibrací na jednotlivých úsecích při průjezdu referenční tramvaje

Tab. 10 Procentuální srovnání šíření vibrací na referenčním úseku a úseku č. 2 při průjezdu tramvaje s plochým kolem

7.3 Seznam obrázků

- Obr. 1. Příklad záznamu akustického tlaku z průjezdu tramvaje referenčním úsekem
- Obr. 2. Maximální, minimální a ekvivalentní hladina hluku
- Obr. 3. Křivky stejné hlasitosti
- Obr. 4. Váhové filtry
- Obr. 5. Šíření hluku z tramvajové dopravy
- Obr. 6. Výškové rozložení zdrojů hluku z elektrického kolejového vozidla
- Obr. 7. Procentní složení emitovaného hluku
- Obr. 8. Závislost hladiny akustického tlaku na rychlosti
- Obr. 9. Kolo vozidla s akustickými tlumiči (absorbéry)
- Obr. 10. Příklad použití stínících krytů u vozů MIVB/STIB 3004 (Photo by Thomas van Berel – Brusel)
- Obr. 11. Pryžové kolejnicové absorbéry (bokovnice)
- Obr. 12. Pryžové kolejnicové absorbéry (bokovnice) [9]
- Obr. 13. Provozní opotřebení kolejnic na ulici Závodní
- Obr. 14. Umístění pružné podložky na ložné ploše pražce
- Obr. 15. Podložky v konstrukci tratě [9]
- Obr. 16. Realizace podložky pod kolejovým ložem (Praha – Vodičkova ulice)
- Obr. 17. Opatření k zamezení přenosu vibrací z kolejové podpory do zákrytového panelu [9]
- Obr. 18. Uspořádání zkušebních úseků P1 a P2 [3]
- Obr. 19. Umístění pružné podložky na ložné ploše pražce [3]
- Obr. 20. Brousící tramvaj na zkušebním úseku tratě [3]
- Obr. 21. Srovnání průměrných hodnot hladin akustického tlaku před a po instalaci bokovnic [5]
- Obr. 22. Frekvenční spektrum před instalací bokovnic [5]
- Obr. 23. Frekvenční spektrum po instalaci bokovnic [5]
- Obr. 24. Pohled na úsek trati směrem do Přívozu osazený bokovnicemi, začátek a konec úseku označen šipkami. [4]

- Obr. 25. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem s bokovnicemi rychlostí 30 km/h [4]
- Obr. 26. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem bez bokovnic rychlostí 30 km/h [4]
- Obr. 27. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem s bokovnicemi rychlostí 40 km/h [4]
- Obr. 28. Průměrovaná spektra hluku při průjezdu úsekem bez bokovnic rychlostí 40 km/h [4]
- Obr. 29. Úsek 1 – aplikace pružného upínacího systému Pandrol Fast Clip [6]
- Obr. 30. Úsek 3 – původní stav tramvajového svršku [6]
- Obr. 31. Umístění zvukoměru pro měření hluku [6]
- Obr. 32. Maximální hladiny akustického tlaku $L_{fast,A,max}$ [dB] pro jednotlivé měřené úseky [6]
- Obr. 33. Příčný řez pryžovou deskou [9]
- Obr. 34. Zádlažbové panely s pryžovou profilovanou vrstvou – ul. Závodní. [9]
- Obr. 35. Schéma zkušebního úseku [9]
- Obr. 36. Zvukoměr typu 2250B s příslušenstvím. [9]
- Obr. 37. Referenční tramvaj - měřicí vůz typu T3 ev. č. 8208 DPO, a.s [9]
- Obr. 38. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojezdové tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 39. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojezdové tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 40. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojezdové tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 41. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojezdové tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 42. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 43. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 44. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 45. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 46. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojezdové tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 47. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojezdové tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 48. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojezdové tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 49. Vzdálenost zvukoměru 15 m od osy pojezdové tramvaje 50 km.h⁻¹ [9]

- Obr. 50. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]
- Obr. 51. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 40 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]
- Obr. 52. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 7,5 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]
- Obr. 53. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]
- Obr. 54. Situace daného úseku
- Obr. 55. Vzorek tmelu Masterflow® 155RG použitého na úseku č. 1
- Obr. 56. Nástřík hmotou Conipur® M800 na úseku č. 2
- Obr. 57. Položené rohože CONIRAP použité na úseku č. 3
- Obr. 58. Konstrukce bez nadstandardních prvků použité na úseku č. 4
- Obr. 59. Zbytky betonu spojujícího zádlahový panel s kolejnicí
- Obr. 60. Provozní opotřebení původní kolejnice na ulici Závodní
- Obr. 61. Situace zkušebních úseků na ulici Závodní.
- Obr. 62. Průjezd pod bytovým domem na ulici Závodní
- Obr. 63. Použitý zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer s větrnou clonou
- Obr. 64. Měřicí osciloskop ScopeCorder DL 720 firmy Yokogawa Electric Corporation
- Obr. 65. Snímače měření vibrací a označení zkušebního úseku
- Obr. 66. Spektrum hluku na referenčním úseku při průjezdu referenční tramvaje
- Obr. 67. Spektrum hluku na úseku č. 1 při průjezdu referenční tramvaje
- Obr. 68. Spektrum hluku na úseku č. 2 při průjezdu referenční tramvaje Obr. 69. Spektrum hluku na úseku č. 3 při průjezdu referenční tramvaje
- Obr. 69. Spektrum hluku na úseku č. 3 při průjezdu referenční tramvaje
- Obr. 70. Spektrum hluku na úseku č. 4 při průjezdu referenční tramvaje
- Obr. 71. Spektrum hluku na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem

- Obr. 72. Vibrace vozovky mimo lože na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem. Vliv plochého kola jasně patrný.
- Obr. 73. Vibrace lože na referenčním úseku při průjezdu tramvaje s plochým kolem. Vliv plochého kola jasně patrný.
- Obr. 74. Spektrum vibrací panelu
- Obr. 75. Situace zkušebního úseku na ulici 28. října.
- Obr. 76. Vlnkovitá kolejnice ve zkušebním úseku na ul. 28. října
- Obr. 77. Použitý zvukoměr typu 2250B firmy Brüel&Kjaer s větrnou clonou
- Obr. 78. Výsledky měření hluku na úseku s kolejnicemi vlnkovitými a rovinnými
- Obr. 79. Frekvenční spektra pro rychlost 50 km/h
- Obr. 80. Frekvenční spektra pro rychlost 55 km/h
- Obr. 81. Vyšší hodnota akustického tlaku u panelů s rohožemi u frekvencí okolo 200 Hz při rychlosti 40 km.h⁻¹ a vzdálenosti 7,5 m. Obr. 82. Vyšší hodnota akustického tlaku u panelů s rohožemi u frekvencí okolo 200 Hz při rychlosti 50 km.h⁻¹ a vzdálenosti 15 m.
- Obr. 83. Vzdálenost zvukoměru 7,5 m od osy pojížděné tramvaje 40 km.h⁻¹ [9]
- Obr. 84. Průměrná spektra akustického tlaku při vzdálenosti zvukoměru 15 m a při rychlosti průjezdu referenční tramvaje 50 km.h⁻¹ ve frekvenčním rozsahu 500 až 5 kHz. [9]